

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2646 – Informační technologie

Studijní obor: 1802R007 – Informační technologie

**Elektronická výbava mobilního robota**

**Electronic equipment of mobile robot**

**Bakalářská práce**

Autor: **Jakub Štěpánek**

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Holada, Ph.D.

**V Liberci 17. 5. 2012**



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií  
Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Štěpánek**  
Osobní číslo: **M09000184**  
Studijní program: **B2646 Informační technologie**  
Studijní obor: **Informační technologie**  
Název tématu: **Elektronická výbava mobilního robota**  
Zadávající katedra: **Ústav informačních technologií a elektroniky**

### Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s aktuálním stavem mobilních robotů na pracovišti školitele.
2. Navrhněte elektronickou výbavu pro průzkumnou miniponorku tak, aby byla moderněji koncipována než stávající provedení.
3. Navržené obvody realizujte.
4. Novou elektronickou výbavu otestujte v reálném provozu.



## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce.

Datum

Podpis



## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Miroslavu Holadovi, Ph.D., za odborné vedení bakalářské práce, za poskytnuté informace, cenné rady, součástky a materiály a vedoucímu univerzitního PCB-labu panu Ing. Leoši Petržílkovi za konzultace ohledně návrhu plošných spojů. Dále bych také rád poděkoval firmě H+H elektronika za pomoc při výběru součástek, firmě Zámečnictví Šimon za cenné rady ohledně konstrukčních prvků a pomoc při jejich úpravě. Velký dík patří i autorům miniponorky, pánům Miroslavu Roubíčkovi a Martinu Peklákovi, kteří ochotně asistovali při zkušebních ponorech a poskytli cenné poznatky z předchozích ponorů.



## Abstrakt

### Elektronická výbava mobilního robota

Hlavním cílem této práce bylo seznámit se s koncepcí a elektronickou výbavou průzkumné miniponorky. V laboratorním a reálném provozu pak odhalit její nedostatky. Na základě těchto poznatků navrhnout a vytvořit novou elektronickou výbavu, která vyřeší nedostatky výbavy stávající a realizuje požadované nové funkce. Miniponorka bude obsluhována ze souše libovolným PC s ovládacím softwarem pro komunikaci s řídicím PC uvnitř miniponorky. Spojení bude zajišťovat ethernetový kabel. Miniponorka bude dále obsahovat vlastní mikrokontrolér, který bude přijímat povely od řídicího PC uvnitř miniponorky a ovládat další elektroniku, navrženou pro práci s elektromotory, čerpadly a světy. Zbylé elektronické části se budou starat o rozvod energie po miniponorce a zajišťovat ochranu proti zkratu.

Tato práce pojednává o návrhu a realizaci elektronické výbavy, která přijme, zpracuje a vykoná povely, zadané interním řídicím PC, pomocí standardní sériové linky. Na základě příkazu pak provede konkrétní nastavení hodnot, či měření vstupních veličin, nebo vyšle signál příslušné elektronické části, která aktivuje konkrétní akční člen miniponorky. Provedení operace bude ověřeno odesláním potvrzovacích dat pomocí standardní sériové linky zpět do interního řídicího PC.

Elektronika byla rozdělena do následujících samostatných částí: napájecí deska, ovládání elektromotorů, ovládání čerpadel, ovládání světla a řídicí deska s mikrokontrolérem PICAXE-18M2.

**Klíčová slova:** miniponorka, H-můstek, PICAXE-18M2, sériová linka.



## Abstract

### Electronic equipment of mobile robot

The main objective of this work was to become familiar with the concept and electronic equipment of survey mini submarine. In the laboratory and the real environment discover its weaknesses. Based on this knowledge design and develop new electronic equipment which solves the weaknesses of existing equipment and implements the required new functionality. Mini submarine will be managed by any PC with control software from the shore, which will communicate with the control PC inside the mini submarine using an ethernet cable. Mini submarine will contain its own microcontroller that receives commands from the control PC inside the mini submarine and will manage other electronics designed to work with electric motors, pumps and lights. The remaining electronic will take care of mini submarine power distribution, and provide protection against short circuits.

This work gives an overview of the design and realization of electronic equipment that receives, processes and executes commands specified by internal control PC via a standard serial bus. Based on the received command is performed measurement of input values, setting of internal control variables or sent signal to the electronic which activates specific mini submarine actuator. The operation will be verified by sending confirmation data via a standard serial bus back to the internal control PC.

Electronics was divide into several parts, namely: power board, control of electric motors, control of pumps, control of lighting and control board with microcontroller PICAXE-18M2.

**Keywords:** mini submarine, H-bridge, PICAXE-18M2, serial bus.



## Obsah

<b>Zadání .....</b>	<b>2</b>
<b>Prohlášení .....</b>	<b>3</b>
<b>Poděkování .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstrakt .....</b>	<b>5</b>
<b>Obsah .....</b>	<b>7</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam rovnic .....</b>	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>10</b>
<b>Seznam použitých zkratk .....</b>	<b>10</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Historie průzkumné školní miniponorky .....</b>	<b>12</b>
<b>2 Seznámení s původním stavem, nedostatky a požadavky .....</b>	<b>13</b>
2.1 Původní stav miniponorky .....	13
2.1.1 Tělo miniponorky .....	13
2.1.2 Akční členy .....	13
2.1.3 Elektronika .....	14
2.2 Seznámení s nedostatky původní koncepce .....	15
2.2.1 Mechanické nedostatky .....	15
2.2.1 Elektronické nedostatky .....	16
2.3 Požadavky na novou koncepci a její návrh .....	17
2.3.1 Požadavky na novou koncepci .....	17
2.3.1 Návrh nové koncepce .....	18
<b>3 Mechanické úpravy.....</b>	<b>19</b>
3.1 Panelové průchodky pro vodiče.....	19
3.2 Průchodka pro sání čerpadla a přidání filtračního sítka.....	19
3.3 Chladiče .....	20
3.4 Montážní lišty .....	20
3.5 Zkouška těsnosti.....	21
<b>4 Nové elektronické části.....</b>	<b>22</b>
4.1 Testovací deska .....	22



4.2	H-můstek čerpadel .....	23
4.2.1	Silová část .....	23
4.2.2	Ovládací část .....	24
4.2.3	Optické oddělení .....	26
4.2.4	Zhotovení prototypu .....	27
4.2.5	Testování prototypu .....	28
4.3	H-můstek elektromotorů .....	29
4.3.1	Zvýšení spínací rychlosti .....	29
4.3.2	Zvýšení proudového zatížení DPS.....	30
4.3.3	Problematika leptání DPS s větší vrstvou mědi.....	30
4.3.4	Rozdělení silové a logické části.....	30
4.3.5	Zhotovení H-můstku elektromotorů .....	31
4.3.6	Testování H-můstku.....	31
4.4	Spínací deska.....	32
4.5	Ovládací deska .....	33
4.6	Napájecí deska .....	34
<b>5</b>	<b>Program pro ovládací desku.....</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>Sestavení a otestování miniponorky .....</b>	<b>37</b>
6.1	Montáž elektroniky do miniponorky.....	37
6.1.1	Montáž elektroniky .....	37
6.1.2	Otestování sestavy .....	38
6.2	Závěrečný zkušební ponor .....	39
6.3	Návrhy do budoucna .....	40
6.3.1	Návrhy softwarových úprav.....	40
6.3.2	Návrhy mechanických úprav .....	40
6.3.3	Návrhy elektronických úprav.....	41
	<b>Závěr .....</b>	<b>43</b>
	<b>Použitá literatura a zdroje informací.....</b>	<b>44</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>46</b>
	Příloha A – Přiložené CD .....	46
	Příloha B – Kompletní schémata.....	46





## Seznam obrázků

Obrázek 1: Pohled zepředu [4] .....	13
Obrázek 2: Vnitřek miniponorky [4] .....	13
Obrázek 3: Čerpadlo ostřikovačů [4] .....	13
Obrázek 4: Elektromotor miniponorky[4] .....	13
Obrázek 5: LED osvětlení[4] .....	13
Obrázek 6: Řídící PC [4] .....	14
Obrázek 7: Experimentální USB karta [4] .....	14
Obrázek 8: H-můstek pro elektromotory [4] .....	14
Obrázek 9: H-můstek pro čerpadlo .....	14
Obrázek 10: Blokové schéma nové koncepce .....	18
Obrázek 11: Panelové průchodky pro vodiče .....	19
Obrázek 12: Průchodka sání – vnitřní strana .....	19
Obrázek 13: Průchodka sání – vnější strana s filtračním sítkem .....	19
Obrázek 14: Výroba chladiče .....	20
Obrázek 15: Umístění chladiče na boku miniponorky .....	20
Obrázek 16: Umístění montážních lišt .....	20
Obrázek 17: Vzduchový ventil pro ověření těsnosti .....	21
Obrázek 18: Testovací deska – návrh .....	22
Obrázek 19: Testovací deska – zhotovená .....	22
Obrázek 20: H-můstek - silová část .....	23
Obrázek 21: Schéma Rovnice 1 .....	24
Obrázek 22: Schéma Rovnice 2 .....	25
Obrázek 23: Schéma Rovnice 3 .....	25
Obrázek 24: Logická část H-můstku s optickým oddělením vstupů .....	26
Obrázek 25: Návrh DPS prototypu H-můstku .....	27
Obrázek 26: Zhotovený prototyp H-můstku .....	27
Obrázek 27: Naměřená spínací charakteristika optočlenu 4N35 .....	28
Obrázek 28: Spínací charakteristika H-můstku elektromotorů při 1 KHz .....	29
Obrázek 29: Riziko podleptání tenkých drah .....	30
Obrázek 30: Horní patro nového H-můstku .....	31
Obrázek 31: Spodní patro nového H-můstku .....	31
Obrázek 32: Sestavený nový H-můstek .....	31
Obrázek 33: Návrh spínací desky .....	32
Obrázek 34: Zhotovená spínací deska .....	32
Obrázek 35: Návrh ovládací desky .....	33
Obrázek 36: Zhotovená ovládací deska .....	33
Obrázek 37: Schéma obvodu se zenerovou diodou .....	34
Obrázek 38: Převodní charakteristika obvodu se zenerovou diodou .....	35
Obrázek 39: Návrh napájecí desky .....	35
Obrázek 40: Blokové schéma programu pro mikrokontrolér .....	36
Obrázek 41: Umístění elektroniky .....	37
Obrázek 42: Umístění řídicího PC .....	37
Obrázek 43: Otestování sestavy .....	38
Obrázek 44: Zkušební ponor .....	39
Obrázek 45: Magnetický kontakt KSK1A66-1020 [10] .....	42
Obrázek 46: Kompletní schéma testovací desky .....	46
Obrázek 47: Kompletní schéma zapojení H-můstku čerpadel .....	47
Obrázek 48: Kompletní schéma H-můstku elektromotorů .....	48
Obrázek 49: Kompletní schéma spínací desky .....	49
Obrázek 50: Kompletní schéma ovládací desky .....	49
Obrázek 51: Kompletní schéma napájecí desky .....	50



## Seznam rovnic

Rovnice 1: Logická část H-můstku .....	24
Rovnice 2: Přidání blokace .....	25
Rovnice 3: Zapojení z hradel NAND .....	25

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Pravdivostní tabulka H-můstku .....	24
Tabulka 2: Převodní charakteristika obvodu .....	34

## Seznam použitých zkratk

<b>DPS</b>	Deska plošného spoje
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board – deska plošného spoje
<b>LED</b>	Light-Emitting Diode – dioda emitující světlo
<b>RAM</b>	Random-access memory – paměť s přímým přístupem
<b>USB</b>	Universal Serial Bus – univerzální sériová sběrnice
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation – pulzně šířková modulace



## Úvod

Průzkumná školní miniponorka je projekt, jehož cílem je vytvoření funkčního, ponoruschopného mobilního robota, řízeného ze souše libovolným PC s ovládacím softwarem. Robot bude schopen pohybovat se pod vodní hladinou libovolným směrem, vykonávat dané příkazy a pořizovat fotografie nebo videozáznam. Dále také například mapovat tvar dna nebo prostor zatopených jeskyní či důlních štol, případně i odebírat vzorky ze dna.

V současné době existuje několik druhů ponorek využívaných pro různé práce, například ke zkoumání mořského dna a živočichů, kteří ho obývají, nebo průzkumu ztroskotaných lodí. Miniponorky jsou často využívány policejními útvary při vyšetřování a také hasičskými sbory při kontrolách potrubí, či odstraňování ekologických katastrof. Miniponorky jsou nenahraditelné zejména tam, kde se potápěč nevejde, případně by byl ohrožen jeho život, či zdraví.

Tento projekt je postupně realizován formou bakalářských či diplomových prací a projektů, díky kterým se postupně blížíme ke stanovenému cíli. Tato práce se zabývá zejména úpravou a vývojem nové vnitřní elektroniky na základě zjištěných nedostatků a nových požadavků. Cílem práce je vytvoření nové, lépe koncipované a modulární elektroniky, která bude dostatečně dimenzovaná pro použití v reálném prostředí.

Pro testování logických obvodů byl použit software Logisim 2.7.1 [1] a pro návrh kompletních obvodů a DPS pak program Eagle 5.11.0 [2]. Samotné zhotovení DPS potom probíhalo v domácích podmínkách, vyjma atypických desek, jejichž výroba byla přenechána univerzitnímu PCB-labu. Program pro mikrokontrolér PICAXE-18M2 byl napsán v jazyce BASIC.



## 1 Historie průzkumné školní miniponorky

Tento projekt vznikl díky Ing. Miroslavu Holadovi, Ph.D. Účelem projektu je prohloubení znalostí při vývoji mobilních robotů, určených pro práce v reálném prostření. Vzhledem k tomu, že jak na naší, tak i na ostatních univerzitách je vyvíjeno množství mobilních robotů, kteří se pohybují po souši nebo ve vzduchu, vydal se náš projekt pod vodní hladinu. Založen byl ve školním roce 2009/2010 a v následujících letech na něm byly vedeny tyto práce:

### 2009/2010:

Jiroušek Petr:	Průzkumná miniponorka - návrh a realizace ovládacího softwaru
Roubíček Miroslav:	Průzkumná miniponorka - návrh a realizace elektropohonu
Peklák Martin:	Průzkumná miniponorka - návrh a realizace systému napájení
Oliva Jan:	Průzkumná miniponorka - návrh a realizace kamerového systému

### 2010/2011:

Vričan Ondřej:	3D Vizualizace průzkumné miniponorky
Roubíček Miroslav:	Návrh konstrukce experimentální dálkově řízené průzkumné miniponorky [3]
Peklák Martin:	Návrh elektronické výbavy experimentální dálkově řízené miniponorky [4]

### 2011/2012:

Peklák Martin:	Projekt miniponorka - možnosti statického a dynamického dovažování
Zajíc Tomáš:	Projekt miniponorka – grafický ovládací terminál
Svoboda David:	Projekt miniponorka – nízkoúrovňový řídicí software
Štěpánek Jakub:	Elektronická výbava mobilního robota



## 2 Seznámení s původním stavem, nedostatky a požadavky

### 2.1 Původní stav miniponorky

#### 2.1.1 Tělo miniponorky



Obrázek 1: Pohled zepředu [4]



Obrázek 2: Vnitřek miniponorky [4]

Miniponorka je složena z několika samostatných komor a konstrukčních prvků [3]. Hlavní částí je kovová komora (Obr. 2), která obsahuje plastovou balastní komoru pro nasávání vody z vnějšku miniponorky, čímž dojde k jejímu ponoření. Zde jsou také umístěny všechny elektronické části miniponorky. Další dvě plastové komory jsou umístěny na přední části komory hlavní. Ve vrchní je umístěna webkamera (Obr. 1) pro snímání obrazu a ve spodní je umístěn LED diodový světlomet. Na spodní straně miniponorky jsou umístěny plastové průduchy s pohybovými elektromotory.

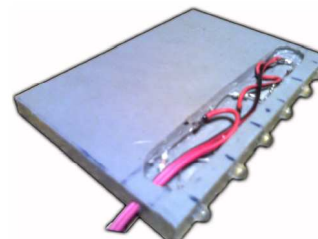
#### 2.1.2 Akční členy



Obrázek 3: Čerpadlo ostřikovačů[4]



Obrázek 4: Elektromotor miniponorky[4]



Obrázek 5: LED osvětlení[4]

O napouštění a vypouštění balastní komory se stará čerpadlo z ostřikovačů automobilu Škoda 120 (Obr. 3). Jedná se o silné zubové čerpadlo, které okamžitě nepropustí vytvořený tlak zpět. Pohyb miniponorky zajišťují stejnosměrné elektromotory ze stahování okének automobilu Peugeot 607 (Obr. 4), opatřené gufery (pryžové těsnění hřídele a ložisek) pro použití pod vodou. Osvětlení zajišťuje LED diodový panel (Obr. 5), umístěný v komoře pod webkamerou.

### 2.1.3 Elektronika

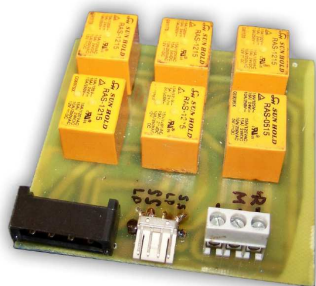


Obrázek 6: Řídící PC [4]

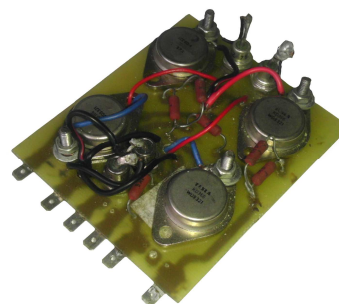


Obrázek 7: Experimentální USB karta [4]

Jádrem miniponorky je základní deska z notebooku (Obr. 6) s procesorem Intel Pentium na pracovní frekvenci 1,4 GHz, pamětí RAM o kapacitě 2 GB a operačním systémem Windows XP Profesionál 32-bit. Toto PC předává příkazy USB experimentální kartě INTERFACE BOARD K8055 (Obr. 7), která následně ovládá světla a další elektroniku manipulující s ostatními akčními členy [4].



Obrázek 8: H-můstek pro elektromotory [4]



Obrázek 9: H-můstek pro čerpadlo

Ovládání elektromotorů miniponorky zajišťuje výkonový relátkový H-můstek (Obr. 8). Ten přijímá příkazy od USB experimentální karty a podle potřeby ovládá motory pro pohyb vpřed, zpět nebo pro otáčení. Obdobným způsobem je ovládán a pracuje tranzistorový H-můstek pro ovládání čerpadla (Obr. 9).



## 2.2 Seznámení s nedostatky původní koncepce

Po seznámení s výbavou miniponorky a jejím testování v laboratorních podmínkách byl kvůli zjištění nedostatků a seznámení s funkcemi miniponorky v praxi proveden zkušební ponor v mlékárenském rybníce ve městě Osečná. Miniponorka v původní výbavě byla schopná spínat elektromotory, čerpadlo i světlomety přes experimentální USB kartu. Ovládána byla z PC na břehu, propojeného ethernetovým kabelem s řídícím PC uvnitř miniponorky přes vzdálenou plochu pomocí softwaru, nainstalovaného v řídícím PC uvnitř miniponorky. Software předával pohybové příkazy experimentální USB kartě a zároveň byl schopen pořizovat obrazové záznamy pomocí kamery umístěné v miniponorce. Testováním v laboratorních podmínkách a zkušebním ponorem byly odhaleny následující nedostatky.

### 2.2.1 Mechanické nedostatky

Prvním z mechanických nedostatků byla částečná netěsnost v místě průchodu vodičů ven z komory směrem k elektromotorům. Vodiče procházely přímo skrz plechovou komoru provrtaným otvorem a zatěsněny byly silikonovým tmelem. Už při slabší mechanické námaze docházelo k poškození tmelu o hrany plechu. Průchod se tak stal netěsný a ohrožoval elektroniku uvnitř miniponorky.

Dalším nedostatkem byla absence vstupního filtru nebo sítka, které by zamezilo nasátí nečistot čerpadlem. Takto docházelo k zanášení jak balastní komory, tak samotného čerpadla, což vedlo k opotřebení vnitřního mechanismu čerpadla a hrozilo tak jeho nevratné poškození.

Jako problémové se ukázalo i původní usazení elektroniky v polystyrenových blocích (Obr. 6). Při nárazu miniponorky nebo jen při přepravě ze souše do vody docházelo k uvolňování elektronických částí ze svých pozic. Hrozilo tak nebezpečí zkratu a vzhledem k použití polystyrenu i zvýšené nebezpečí následného požáru.

Posledním z mechanických nedostatků byla absence chladících prvků. Vzhledem k tomu, že miniponorka obsahuje i výkonovou elektroniku, bylo nutné navržení chladicího systému, který umožní co nejlepší rozložení elektroniky po miniponorce a zároveň bude zabírat co nejmenší prostor.



### 2.2.1 Elektronické nedostatky

Nevýhodou původní koncepce bylo použití experimentální USB karty oproti řídicí desce s vlastním mikrokontrolérem. Tato karta sloužila pouze pro zprostředkování vstupů a výstupů. Neumožňovala implementaci žádné vnitřní logiky a o vše se tedy muselo starat řídicí PC. Karta má pevné rozložení vstupů, výstupů i montážních děr, na což se musel brát ohled při rozmisťování elektroniky. Další nevýhodou jsou velké rozměry karty, kvůli kterým bylo problémové umístění v relativně malém prostoru uvnitř miniponorky.

Problém se projevil také u H-můstku na ovládání čerpadla. Jeho tranzistory nejsou napojeny na žádný chladič a při dlouhodobém zatížení se tedy značně zahřívají.

Hodně nedostatků se pak objevilo u H-můstku pro ovládání elektromotorů. Ten kvůli minimálním ztrátám nebyl použit tranzistorový, ale relátkový. Tato koncepce ovšem neumožňuje PWM regulaci a tak elektromotory mohou běžet pouze na plný výkon, což zhoršuje manévrovatelnost při pohybu miniponorky. Další nevýhodou relátkové koncepce je nutnost dostatečně tvrdého zdroje napájení. Po delší době provozu, kdy už se částečně vybila baterie, docházelo při rozběhu elektromotorů k silným poklesům napětí, které způsobovalo rozepínání aktivních relátek. H-můstek byl také nedostatečně proudově dimenzován. V praxi se ukázalo, že maximální hodnoty proudového odběru (zvýšené zejména nasátím písku, listí nebo jiných nečistot ze dna vodní plochy do průduchů s elektromotory) značně převyšují naměřené laboratorní hodnoty. H-můstek se tedy v těchto případech značně přehříval a v extrémních případech došlo i k přepálení některých z jeho silových drah.

Nebezpečná byla také absence ochrany proti zkratu. Miniponorka je ve fázi vývoje a často se na ní provádí testování nové elektroniky nebo akčních členů. Při jejich zkoušení nebo jen při neopatrné manipulaci může nechtěně dojít ke zkratu. Velké nebezpečí také nastává v případě zaseknutí elektromotorů vlivem nasátí větších předmětů do pohonné vrtule. Vzhledem k tomu, že se jedná o elektromotor z automobilového průmyslu s velkým výkonem, je odběr proudu při zaseknutí téměř na úrovni zkratu a i s touto možností je nutné počítat a elektroniku před tím ochránit.





## 2.3 Požadavky na novou koncepci a její návrh

### 2.3.1 Požadavky na novou koncepci

Prvním z požadavků nové koncepce bylo zajištění ochrany proti zkratu a možnost měření aktuálního stavu baterií, které informuje uživatele o vybití baterií dříve, než miniponorka přijde o dostatek energie, potřebný k vypořádání a připlutí na břeh. Navrženo tedy bylo vytvoření samostatné napájecí desky, která bude sloužit pro správu veškerého rozvodu energie po miniponorce. Zajišťovat bude také měření stavu baterií a chránit rozvody proti zkratu.

Dalším požadavkem je možnost regulace výkonu pohybových elektromotorů pomocí pulzně šířkové modulace [5]. Pro tyto účely bylo navrženo sestavení výkonového tranzistorového H-můstku s dostatečnou proudovou dimenzací, která zohledňuje i výše popsané extrémní proudové odběry.

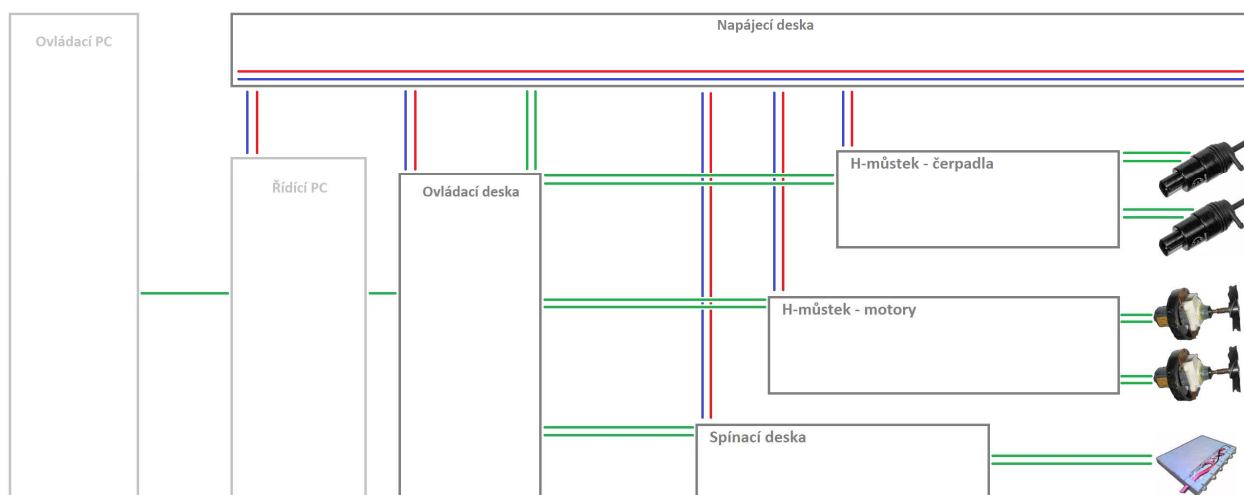
Jedním z plánů mechanických úprav do budoucna je změna z jedné velké balastní komory na dvě malé, kde každá bude mít vlastní čerpadlo z důvodu možnosti naklápění miniponorky. Proto i nový H-můstek pro čerpadla byl požadován dvoukanálový.

Vzhledem k malému prostoru uvnitř miniponorky bylo také požadováno vtěsnat všechnu elektroniku do co nejmenších rozměrů a rozmístit po obvodu miniponorky tak, aby co nejméně zasahovala do prostoru, kde jsou umístěny baterie, balastní komora a dodatečná závaží. Zároveň bylo též požadováno zabudovat do miniponorky systém chlazení elektroniky v kombinaci s lepším mechanickým upevněním elektroniky.

Protože na elektronice miniponorky se často provádí změny, nebo se jednotlivé části upravují či mění, bylo jedním z hlavních požadavků navrhnout celou koncepci modulárně tak, aby změna jakéhokoliv ovládacího prvku, či výměna mikrokontroléru za lepší model, neznamenal nutnost úpravy nebo výměny zbylé elektroniky.

Po shrnutí všech předešlých nedostatků a požadavků byla navržena nová koncepce (Obr. 10), která vyhovovala vedoucímu práce i všem dalším kolegům, pracujícím na projektu miniponorka.

### 2.3.1 Návrh nové koncepce



Obrázek 10: Blokové schéma nové koncepce

Jádrem celého systému bude ovládací deska. Ta bude přijímat povely od řídicího PC pomocí předem dohodnutého datového protokolu po standardní sériové lince. Požadavek zpracuje a aktivuje požadovanou elektroniku nebo vrátí požadovaná data.

H-můstek čerpadel bude přijímat povely od ovládací desky, řídit chod a reverzaci čerpadel. Proudový odběr čerpadel dosahuje maximálně 5 A, tomu musí odpovídat i dimenzace H-můstku.

H-můstek elektromotorů bude fungovat na stejném principu, musí však umožňovat PWM regulaci a proudová dimenzace musí odpovídat značně většímu odběru elektromotorů, který se pohybuje průměrně kolem 9 A. Při nasátí nečistot však elektromotory dosahují odběru až 12 A.

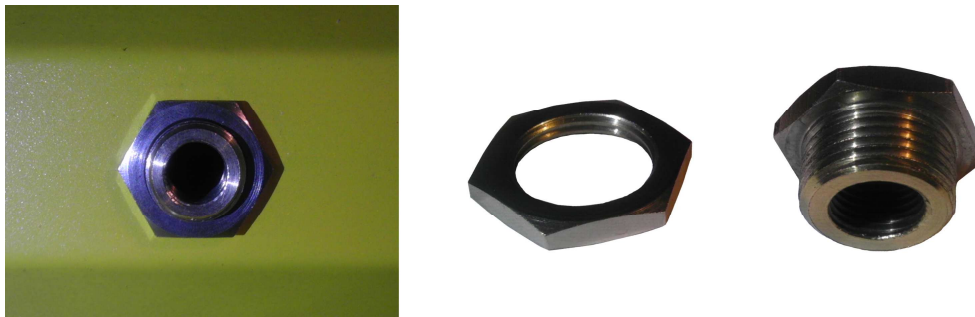
Spínací deska bude přijímat povely od desky ovládací a spouštět zbylé akční členy, které nevyžadují reverzaci. V současné koncepci se jedná hlavně o světla.

O rozvod elektrické energie se bude starat napájecí deska, dále bude zajišťovat ochranu proti zkratu a zajišťovat přístup ovládací desky k měření stavu baterií.



### 3 Mechanické úpravy

#### 3.1 Panelové průchodky pro vodiče



Obrázek 11: Panelové průchodky pro vodiče

Z důvodu zlepšení těsnosti v místě průchodu vodičů ven z miniponorky, byly umístěny do těla miniponorky panelové průchodky (Obr. 11), které zajistí širší stěnu průchodu, jenž se dá lépe zatěsnit silikonovým lepidlem. Díky širší stěně je tak minimalizováno riziko prodření těsnící hmoty.

#### 3.2 Průchodka pro sání čerpadla a přidání filtračního sítka



Obrázek 12: Průchodka sání – vnitřní strana



Obrázek 13: Průchodka sání – vnější strana s filtračním sítkem

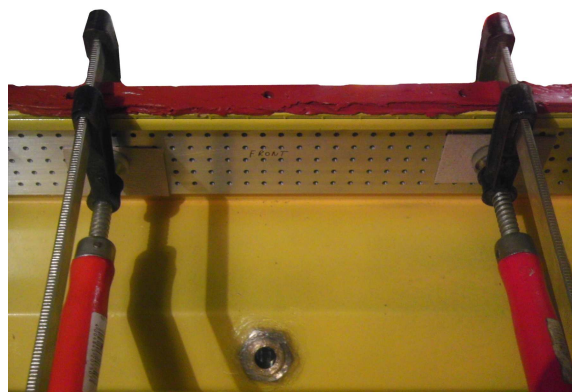
Z důvodu možnosti snazšího napojení hadice od čerpadla byla do těla miniponorky umístěna nová hydraulická panelová průchodka. Vnitřní strana průchodky (Obr. 12) je zubovitě osazena pro lepší mechanické uchycení hadice a lepší těsnost. Vnější strana průchodky (Obr. 13) vypadala obdobně. Z důvodu nedostatku prostoru (přímo pod ní se totiž nachází kryt elektromotoru miniponorky) byla upravena do pravého úhlu. Následně na ní bylo umístěno filtrační sítko, které zabraňuje vniknutí nečistot do čerpadla.



### 3.3 Chladiče



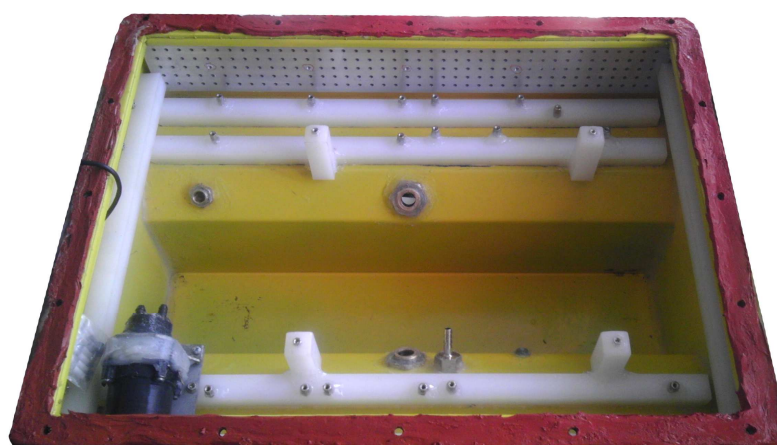
Obrázek 14: Výroba chladiče



Obrázek 15: Umístění chladiče na boku miniponorky

Pro lepší možnost chlazení elektroniky uvnitř miniponorky byly na zakázku vyrobeny chladiče podle předem daných rozměrů a následně navrtány sítí montážních děr s roztečí 10 mm pro uchycení elektroniky (Obr. 14). Na zadní stranu zhotovených chladičů byla ve středové části nanесena tepelně vodivá pasta a u krajů pak lepidlo. Chladiče byly poté přilepeny na boky miniponorky (Obr. 15), kde budou odebírat teplo z elektroniky a předávat ho do těla miniponorky, která bude chlazena okolní vodou.

### 3.4 Montážní lišty



Obrázek 16: Umístění montážních lišt

Pro bezpečné umístění elektroniky byly uvnitř miniponorky nainstalovány plastové lišty, na kterých budou rozmístěny kovové montážní sloupky pro snadné přichycení elektroniky.



### 3.5 Zkouška těsnosti



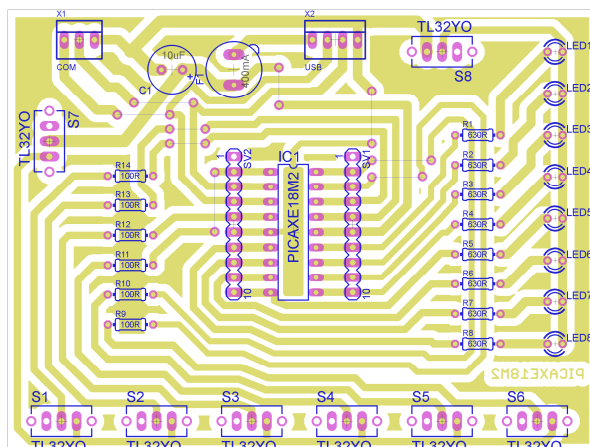
Obrázek 17: Vzduchový ventil pro ověření těsnosti

Po dokončení mechanických úprav, potřebných pro bezpečný provoz elektroniky, bylo nutné zjistit, zda je tělo miniponorky zcela vodotěsné. K tomu slouží vzduchový ventilek umístěný na vrchním víku miniponorky (Obr. 17). Miniponorka byla sestavena a pomocí vzduchového ventilku natlakována. Po natlakování byla miniponorka umístěna pod vodu, kde bylo sledováno, zda nedojde k úniku stlačeného vzduchu. První test odhalil netěsnost miniponorky v přední komoře, kde netěsnilo plexisklo chránící kameru (Obr. 1). Plexisklo bylo demontováno a následně přetěsněno novou vrstvou silikonu. Při druhém testu těsnosti už miniponorka neprojevila žádný únik stlačeného vzduchu, a tudíž by měla být plně připravena pro vývoj elektroniky a jejího následného testování.

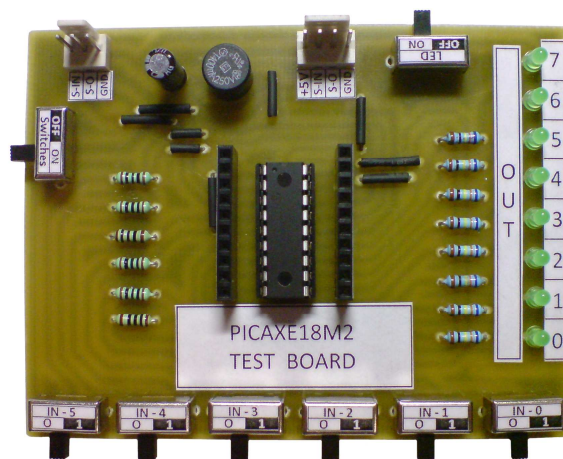


## 4 Nové elektronické části

### 4.1 Testovací deska



Obrázek 18: Testovací deska – návrh



Obrázek 19: Testovací deska – zhotovená

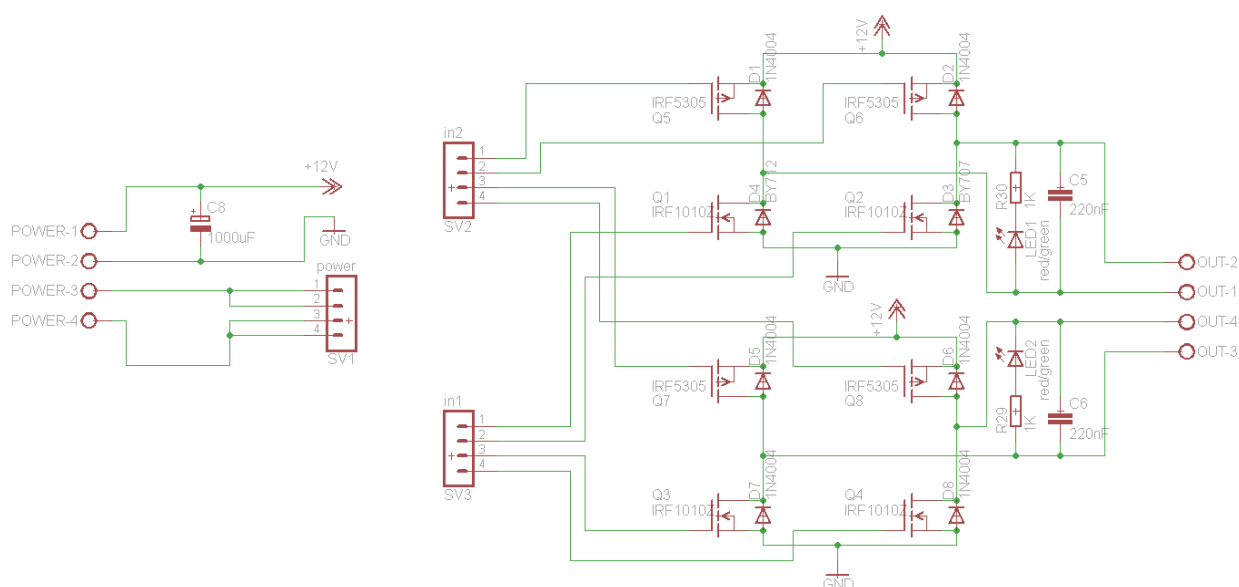
Pro seznámení se základními funkcemi mikrokontroléru PICAXE-18M2 [6] a vyzkoušením jeho zapojení a programování bylo rozhodnuto sestavit nejprve testovací desku (Obr. 19), na které se dále budou testovat ostatní součásti elektronické sestavy průzkumné miniponorky. Obrovskou výhodou mikrokontrolérů PICAXE je umístění programovacích obvodů přímo uvnitř kontroléru. Jediné, co je tedy potřeba k naprogramování, je standardní sériová linka [7]. Pro programování kontroléru slouží konektor X1, který obsahuje datové vedení nebo konektor X2, který obsahuje jak datové vedení, tak napájení. Při programování pomocí standardní sériové linky v počítači stačí zapojit datové vodiče na konektor X1 a přídatné napájení na konektor X2. Druhou možností pro naprogramování mikrokontroléru je úprava redukce z USB na sériovou linku, kdy zároveň použijeme napětí konektoru USB pro napájení mikrokontroléru. V tomto případě stačí upravenou redukci zapojit pouze na konektor X2 a programování můžeme provádět z libovolného PC nebo notebooku s USB portem. Jako ochrana před zkratem a následným možným poškozením programovacího PC slouží pojistka F1. Jako simulace vstupů slouží spínače S1 až S6 a piny v konektorech SV1 a SV2 a jako výstupy jsou využity LED diody LED1 až LED8 a piny v konektorech SV1 a SV2. Přepínač S7 slouží k aktivaci vstupních tlačítek a přepínač S8 k aktivaci LED diod.

## 4.2 H-můstek čerpadel

Vzhledem k tomu, že na H-můstek čerpadel i elektromotorů jsou kladeny téměř stejné požadavky, bylo rozhodnuto navrhnout a sestavit první prototyp H-můstku dimenzovaný na zatížení elektromotorů, který bude otestován, ovšem následně se ponechá pro ovládání čerpadel. Poté podle případných nedostatků prvního prototypu bude upraven a zhotoven H-můstek pro elektromotory.

### 4.2.1 Silová část

Pro dostatečný výkon a minimální ztráty H-můstku bylo rozhodnuto použití mosfetových tranzistorů, konkrétně P-kanálových IRF5305 v pozitivní silové větvi a N-kanálových IRF1010Z v negativní silové větvi (Obr. 20). Tyto tranzistory umožňují proudové zatížení do 31 A, což odběr elektromotorů, který činí při průměrném plném výkonu 9 A a špičkově 12 A, pokryje s dostatečnou rezervou. Kvůli silnému rušení, které vzniká na komutátoru elektromotorů, byly paralelně ke každému tranzistoru přidány diody v závěrném směru, které ořezávají napěťové špičky. Dále pak byl na výstupu každého kanálu přidán filtrační kondenzátor.



Obrázek 20: H-můstek - silová část

#### 4.2.2 Ovládací část

Požadavkem na ovládací část H-můstku bylo hardwarové ošetření hazardních stavů. Standardní kanál H-můstku bývá ovládán dvěma piny, přičemž pin-A aktivuje dopředný chod elektromotoru a pin-B aktivuje chod reverzní. Hazardní stav nastává při aktivaci obou pinů najednou, kdy nastává zkrat v silové části. Vzhledem k tomu, že ošetření tohoto stavu bývá řešeno softwarově, bylo kvůli častým úpravám softwaru a tedy i hrozbě opomenutí tohoto faktu, rozhodnuto ošetřit tento stav hardwarově přímo na H-můstku. Zvoleno tedy bylo ovládání, kdy pin-A bude zapínat elektromotor a pin-B bude řídit reverzaci elektromotoru podle následující pravdivostní tabulky:

pin-A	pin-B	výstup
0	0	vypnuto
0	1	vypnuto
1	0	dopředu
1	1	dozadu

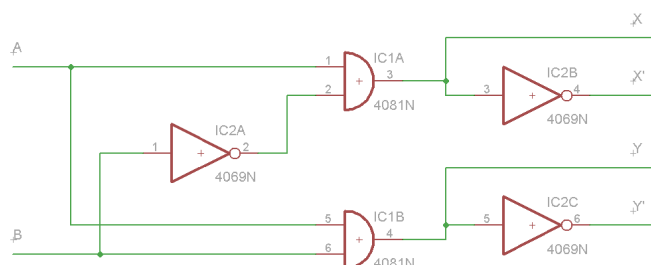
Tabulka 1: Pravdivostní tabulka H-Můstku

Podle pravdivostní tabulky byly pomocí Booleovy algebry [8] sestaveny následující rovnice (Rov. 1) a schéma obvodu (Obr. 21).

$$X = A \cdot \overline{B}$$

$$Y = A \cdot B$$

Rovnice 1: Logická část H-můstku



Obrázek 21: Schéma Rovnice 1

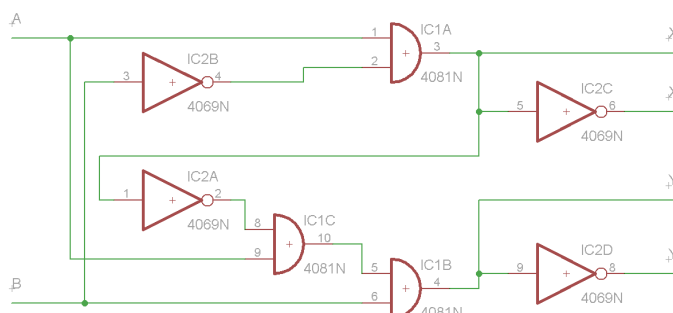
Takto navržený obvod pracoval podle požadavků, ovšem v průběhu testování byla odhalena jeho nebezpečná slabina. Správný postup pro reverzaci elektromotorů je takový, kdy se aktivuje nejdříve reverzní pin a následně teprve pin spínací. Pokud dojde k aktivaci pinů v opačném pořadí, signál pro vypnutí tranzistorů pro dopředný chod musí projít přes dvě hradla, tedy zhruba 80 ns a signál pro aktivaci tranzistorů pro reverzní chod pouze přes jedno hradlo, tedy zhruba 40 ns. Po dobu asi 40 ns tedy nastával zkrat v silové části, který měl za následek poškození některých tranzistorů a logických hradel.



I tento nedostatek bylo potřeba ošetřit na hardwarové úrovni. Proto byla rovnice (Rov. 2) upravena o zpětnou vazbu, která blokuje sepnutí tranzistorů pro reverzní chod, dokud nedojde k deaktivaci tranzistorů pro dopředný chod. Dále bylo sestaveno nové schéma (Obr. 22).

$$\begin{aligned} X &= A \cdot \overline{B} \\ Y &= A \cdot B \cdot \overline{X} \end{aligned}$$

Rovnice 2: Přidání blokace



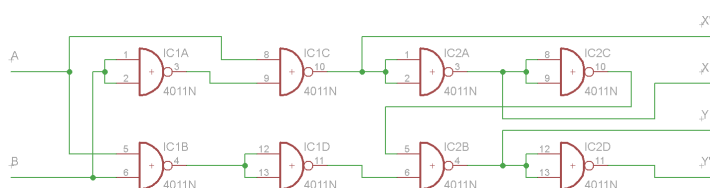
Obrázek 22: Schéma Rovnice 2

Nové schéma zapojení bylo následně otestováno a již nebyla nalezena žádná závada. Toto zapojení tedy nemělo žádný hazardní stav a sneslo i hrubé ovládací zacházení.

Posledním požadavkem na logickou část H-můstku bylo realizovat logickou část pouze z hradel typu NAND a to z návrhářských a cenových důvodů. Rovnice (Rov. 3) byla tedy upravena pomocí zákonů Booleovy algebry na nový tvar a sestaveno bylo nové schéma (Obr. 23).

$$\begin{aligned} X &= A \cdot \overline{B} \\ Y &= (A \cdot B) \cdot \overline{X} \end{aligned}$$

Rovnice 3: Zapojení z hradel NAND



Obrázek 23: Schéma Rovnice 3

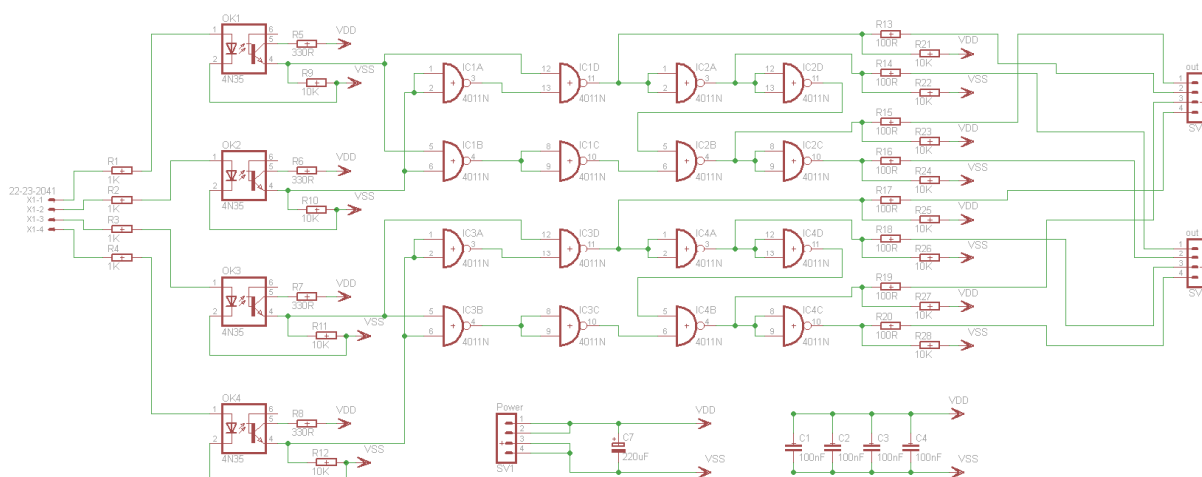
Poslední úprava schématu byla opět kompletně otestována a nové zapojení prokázalo svou funkčnost, absenci hazardních stavů a bezpečnost při přechodu mezi jednotlivými stavy.



### 4.2.3 Optické oddělení

Další překážkou při vývoji H-můstku byl rozdíl napěťových hodnot. H-můstek bude spínat napětí o rozsahu zhruba 9–14 V. Ovládán však bude signálem o rozsahu 0–5 V, případně 0–3,3 V při použití jiného mikrokontroléru. Do obvodu tedy bylo nutné vložit optočleny, které napěťové rozdíly vyrovnají. Problémem však bylo umístění optočlenů. Pokud by optočleny byly umístěny standardně mezi logickou a silovou částí, bylo by jich zapotřebí osm a to by značně rozšířilo prostorové nároky H-můstku. Další nevýhodou tohoto zapojení je možnost krátkodobých zkratů, které by mohly vznikat při přechodu mezi stavy H-můstku, vlivem různých hodnot časového zpoždění optočlenů (řádově desítky mikrosekund). Z těchto důvodů bylo zvoleno poměrně nestandardní umístění optočlenů a to hned na vstupu H-můstku. V tomto případě je zapotřebí pouze poloviční počet optočlenů a odpadá také problém s případným zpožděním jednotlivých optočlenů, o který se postará hradlová logika, umístěná až za optočleny.

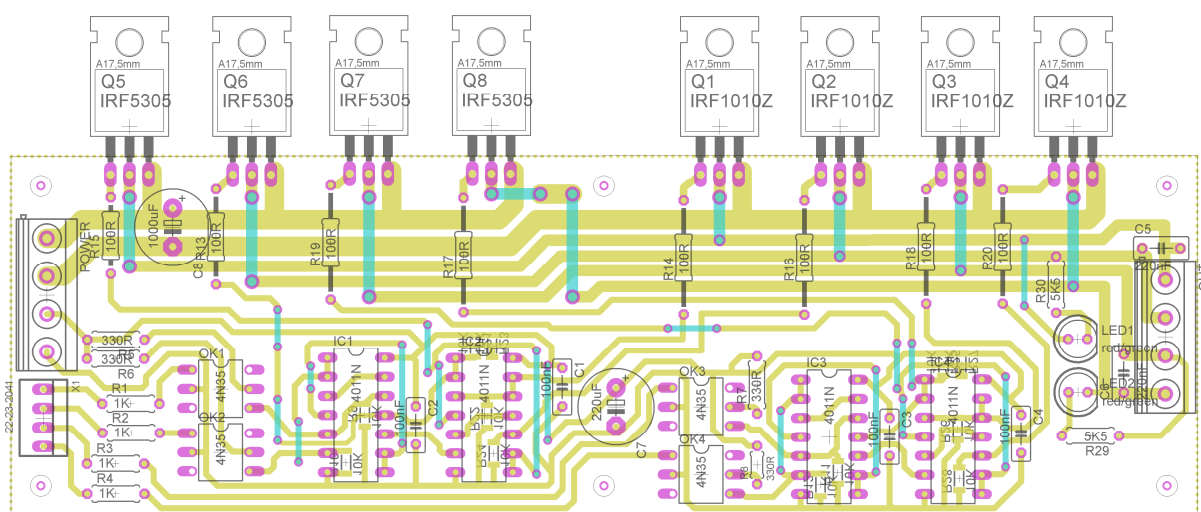
Největší výhodou tohoto zapojení s použitými optočleny je však velký napěťový rozsah ovládacího vstupu. Ten může být v tomto konkrétním zapojení (Obr. 24) ovládán logikou o rozsahu 2–18 V. Nevýhodou tohoto zapojení je vystavení hradel rušení, které může procházet skrz tranzistory. Z tohoto důvodu má navržený H-můstek samostatné napájení hradel, a každé hradlo má na vstupu napájení filtrační kondenzátor.



Obrázek 24: Logická část H-můstku s optickým oddělením vstupů

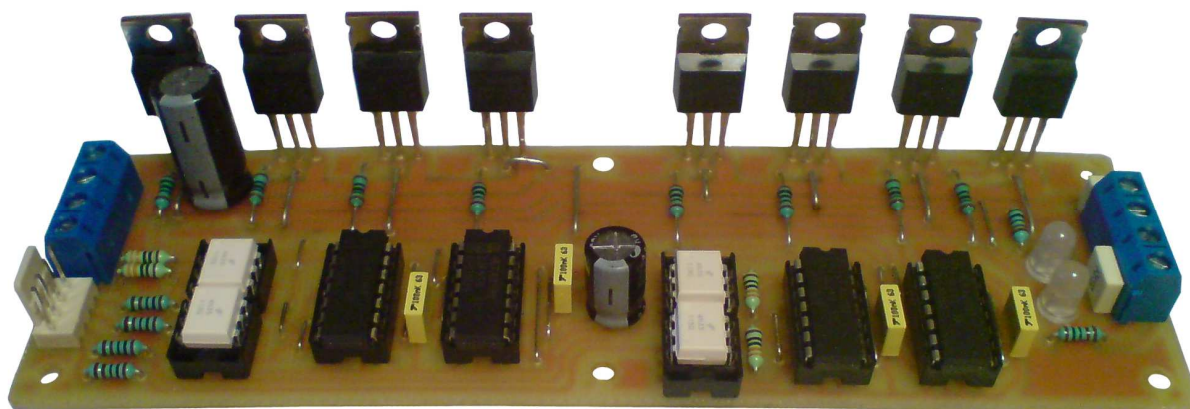
#### 4.2.4 Zhotovení prototypu

Po otestování kompletního zapojení bylo rozhodnuto sestavit první prototyp H-můstku pro důkladnější otestování a zátěžové testy. Kvůli malému prostoru uvnitř miniponorky byl rozměr DPS stanoven na rozměr 50×160 mm, kde bude umístěna jak logická, tak silová část. Dalším omezením byla nutnost umístění všech tranzistorů na jednu stranu plošného spoje směrem k bočnímu chladiči miniponorky (Obr. 25).



Obrázek 25: Návrh DPS prototypu H-můstku

Plošný spoj byl zhotoven ze standardní jednostranné cuprexitové desky s tloušťkou měděné vrstvy 35  $\mu\text{m}$ . Vzhledem k tomu, že na desce nebyl prostor pro dostatečnou šířku silových drah, byly tyto dráhy zesíleny pocínováním. Prototyp (Obr. 26) byl následně osazen a byla otestována jeho funkčnost.



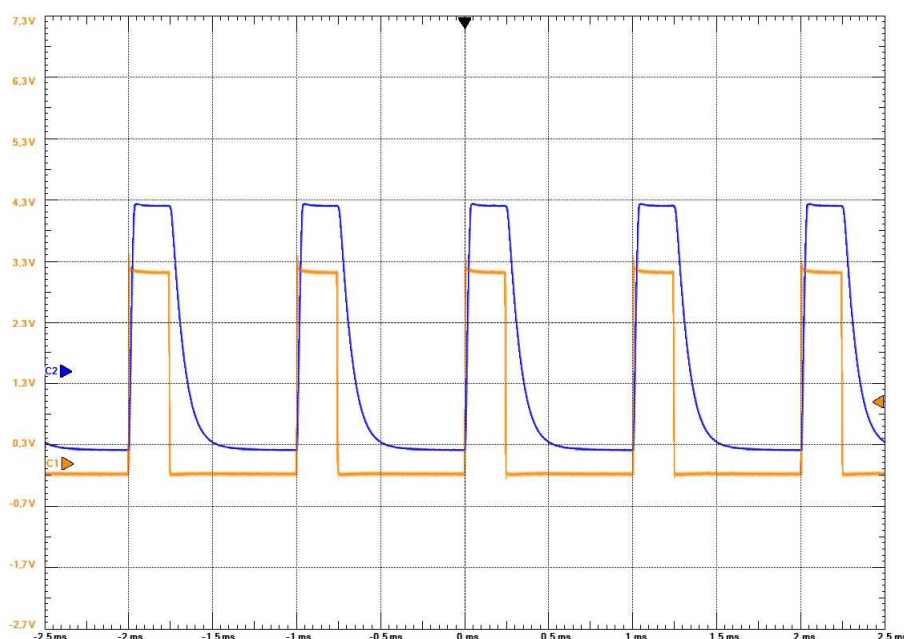
Obrázek 26: Zhotovený prototyp H-můstku



#### 4.2.5 Testování prototypu

Při testování prototypu byly objeveny dva nedostatky. Prvním bylo zahřívání přechodových můstků a silových drah při plném výkonu elektromotorů, ovšem pro čerpadla byla dimenzace dostatečná.

Druhým problémem bylo velké časové zpoždění při spínání optočlenů (Obr. 27), které zbrzdilo sepnutí silové části o zhruba 60  $\mu$ s. To znamenalo snížení maximální použitelné frekvence pro pulzně šířkovou modulaci na zhruba 500 Hz. Při vyšších frekvencích se začala značně snižovat strmost spínací charakteristiky prototypu H-můstku a docházelo tak na něm k vyšším ztrátám.



- Budící signál

- Výstupní signál

Obrázek 27: Naměřená spínací charakteristika optočlenu 4N35

Tento prototyp H-můstku tedy nesplňoval požadavky pro ovládání elektromotorů miniponorky. Ovšem splňoval proudové požadavky pro ovládání čerpadel. Vzhledem k tomu, že čerpadla není zapotřebí ovládat PWM regulací, tento H-můstek tak splňoval všechny požadavky pro ovládání čerpadel miniponorky. Rozhodnuto tedy bylo ponechat tento prototyp pro ovládání čerpadel a elektromotorům navrhnout a vyrobit H-můstek nový.

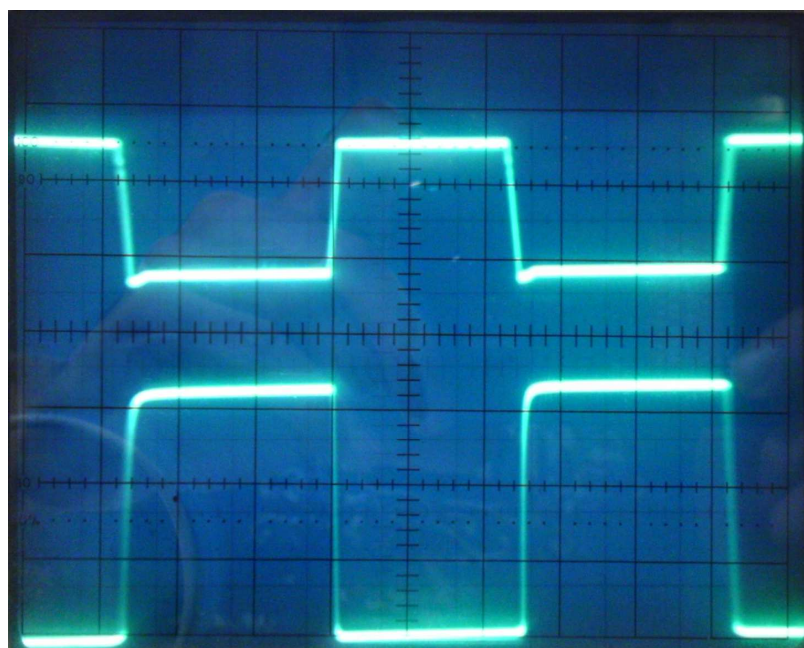


## 4.3 H-můstek elektromotorů

H-můstek pro elektromotory vychází z koncepce prvního prototypu. Schéma silové i ovládací části bylo ponecháno stejné, protože se ve všem osvědčilo. Nutné však bylo vyřešit zvýšení rychlosti spínání H-můstku a zajistit lepší mechanické zpracování DPS kvůli lepší proudové dimenzaci.

### 4.3.1 Zvýšení spínací rychlosti

Pro zvýšení spínací rychlosti bylo rozhodnuto vyměnit použité optočleny. Nově byly použity rychlejší modely CNY17-3. Dále byly u optočlenů sníženy hodnoty všech rezistorů na vstupech signálu i napájení pro zvýšení strmosti spínací charakteristiky. Výsledkem těchto úprav bylo kratší zpoždění sepnutí H-můstku na zhruba 10  $\mu\text{s}$ , což je šestinásobné zrychlení oproti prototypu. Takto navržený H-můstek umožňuje maximální frekvenci pulzně šířkové modulace na zhruba 3 KHz. Následným testováním bylo zjištěno, že optimální frekvence pro PWM regulaci daných elektromotorů a H-můstku je 1 KHz. Při této frekvenci se elektromotory točí plynule bez vibrací a spínací charakteristika H-můstku má vysokou strmost. Nedochází tak k velkému zpoždění a zbytečným ztrátám.



- Budící signál

- Výstupní signál

Obrázek 28: Spínací charakteristika H-můstku elektromotorů při 1 KHz

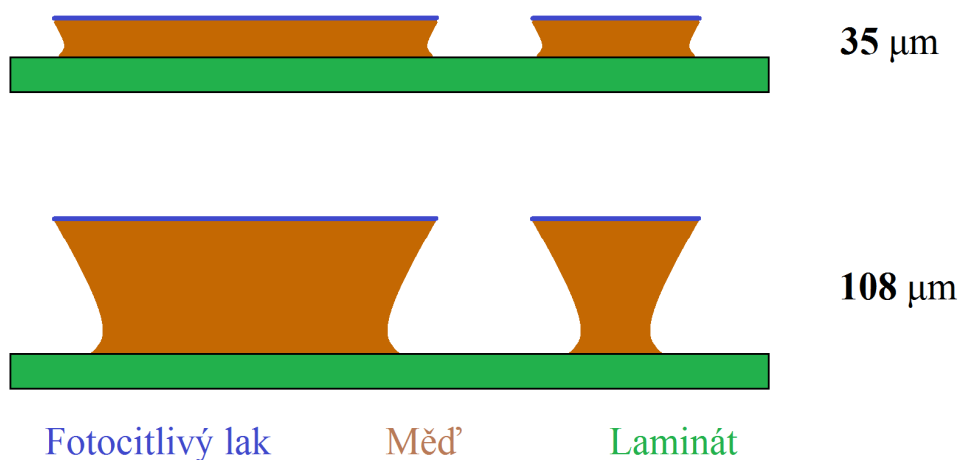


#### 4.3.2 Zvýšení proudového zatížení DPS

Z důvodu lepší proudové dimenzace bylo rozhodnuto použití cuprexitové desky se silnější vrstvou mědi. Vzhledem k tomu, že tyto desky nebývají běžně dostupné v prodejnách, byla výroba ponechána univerzitnímu PCB-labu. Zde je dostupný cuprexit o šířce 108  $\mu\text{m}$ . Při konzultaci ohledně předloženého návrhu DPS bylo zjištěno riziko problematiky leptání DPS s větší vrstvou mědi.

#### 4.3.3 Problematika leptání DPS s větší vrstvou mědi

Problémem při leptání DPS s větší vrstvou mědi je riziko podleptání tenkých drah. Pokud například máme dráhu o šířce 0,5 mm, při jejím vyleptání na cuprexitu o šířce mědi 35  $\mu\text{m}$  dochází pouze k minimálnímu podleptání ze stran. Ovšem u cuprexitu o šířce 108  $\mu\text{m}$  musí účinkovat leptací roztok mnohem déle, aby odstranil nežádoucí měď až na dno. Tím ale také mnohem více naleptává boční stěny, a tak dochází k podleptávání měděných drah (Obr. 29). Takto podleptaná tenká dráha přichází o svou plochu přilnutou k laminátu a hrozí tak její odtržení.



Obrázek 29: Riziko podleptání tenkých drah

#### 4.3.4 Rozdělení silové a logické části

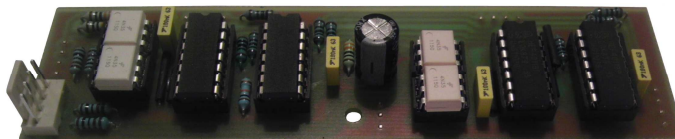
Vzhledem k výše uvedené problematice bylo rozhodnuto vytvořit pro nový H-můstek dvoupatrovou DPS, kde bude horní patro obsahovat logickou část z tenkých drah a bude tedy vyrobeno z cuprexitu o šířce 35  $\mu\text{m}$  a spodní patro bude obsahovat silovou část ze silných drah a bude vyrobeno z cuprexitu o šířce 108  $\mu\text{m}$ . Patra budou mezi sebou propojena řadovými vidlicemi, které budou sloužit jak pro přenos signálu, tak jako mechanické prvky pro spojení obou pater.



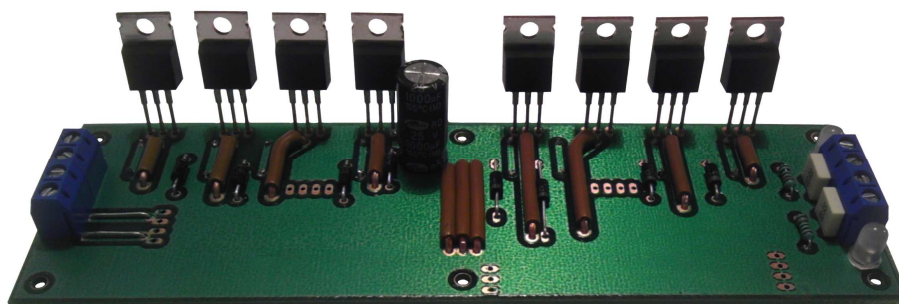


#### 4.3.5 Zhotovení H-můstku elektromotorů

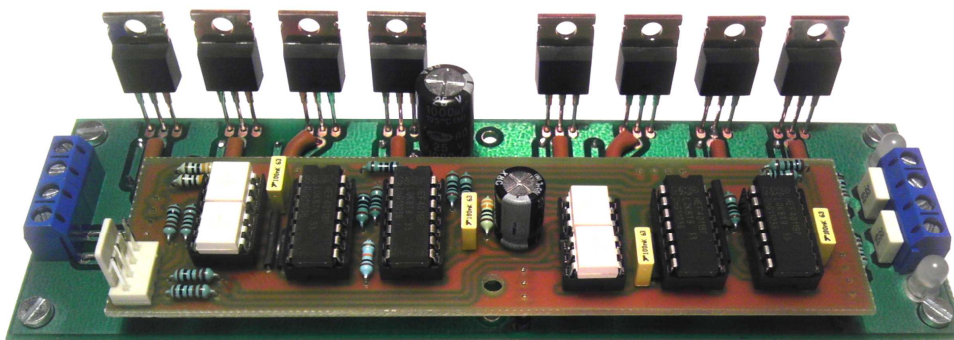
Po rozdělení schématu byly vytvořeny i nové návrhy horního (Obr. 30) i dolního (Obr. 31) patra DPS a předány na výrobu do PCB-labu. Po zhotovení byly osazeny a zapojeny dohromady (Obr. 32).



Obrázek 30: Horní patro nového H-můstku



Obrázek 31: Spodní patro nového H-můstku

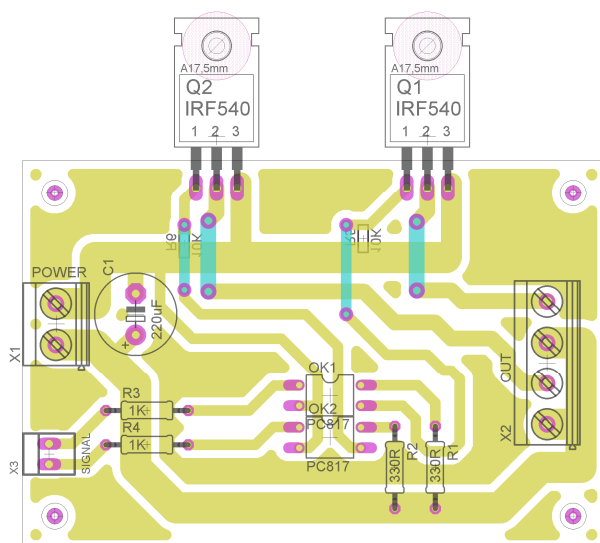


Obrázek 32: Sestavený nový H-můstek

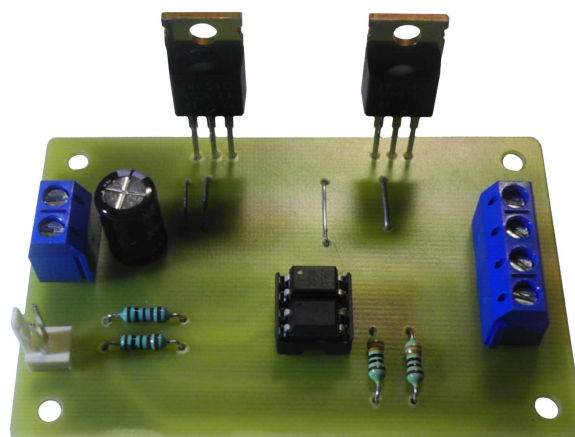
#### 4.3.6 Testování H-můstku

Nově sestavený druhý H-můstek byl opět otestován a tentokrát vyhověl všem podmínkám pro použití na ovládání elektromotorů. H-můstek pracoval bezproblémově na požadované frekvenci 1 KHz a při plném zatížení se žádná část DPS nezahřívala. Vzhledem k úpravě optočlenů a zvýšení strmosti spínací charakteristiky byly i teplotní ztráty na tranzistorech nižší než u prvního prototypu.

## 4.4 Spínací deska



Obrázek 33: Návrh spínací desky



Obrázek 34: Zhotovená spínací deska

Spínací deska byla navržena ke spínání zbylých akčních členů, které nevyžadují reverzaci. V aktuální koncepci se jedná o světlomety miniponorky. Vzhledem k rozvržení všech ostatních elektronických částí miniponorky zbyly na mikrokontroléru poslední dva výstupy a proto i spínací deska byla požadována dvoukanálová.

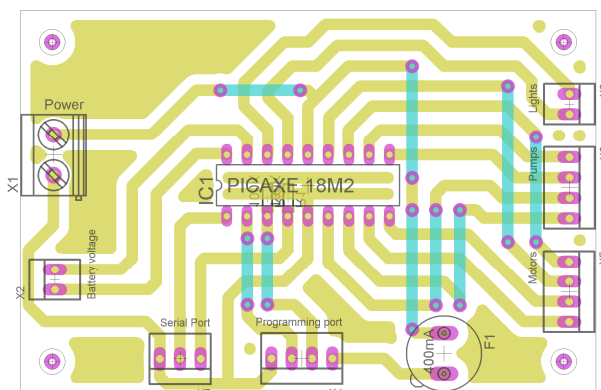
Deska obsahuje napájecí terminál X1, výstupní terminál X2 a vstupní signálový konektor X3, který přivádí signál na optočleny OK1 a OK2. Optočleny zde opět řeší problematiku spínání 9-14 V výstupu pomocí 5 V logického signálu. O samotné spínání se starají N-kanálové mosfetové tranzistory IRF540, u kterých výrobce udává maximální možné zatížení až 23 A.

Sestavená spínací deska (Obr. 34) byla otestována a splnila všechny požadavky. Vzhledem k tomu, že v současné koncepci světla miniponorky jsou všechny světlomety propojeny paralelně a dovnitř miniponorky od nich vede pouze jeden pár vodičů, byla světla zapojena pouze na jeden kanál. Druhý kanál je prozatím nevyužit. Do budoucna je však v plánu zvýšit počet světlometů a tedy i na tento případ je nyní miniponorka připravena.

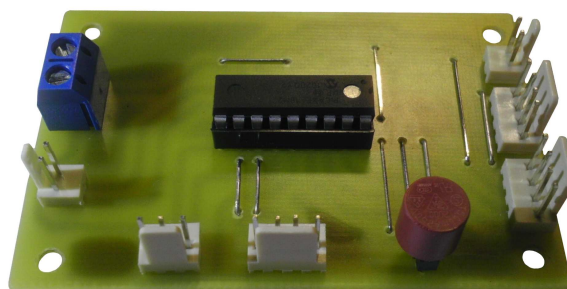




## 4.5 Ovládací deska



Obrázek 35: Návrh ovládací desky



Obrázek 36: Zhotovená ovládací deska

Ovládací deska bude přijímat příkazy od řídicího PC uvnitř miniponorky a ovládat všechny ostatní elektronické části miniponorky. V podstatě se jedná o zjednodušenou verzi testovací desky. Vzhledem k tomu, že testovací deska neprojevila během provozu žádné chyby či nedostatky, zůstalo zapojení vstupů, výstupů a sériových linek téměř stejné.

Jádrem ovládací desky je opět mikrokontrolér PICAXE-18M2. Deska dále obsahuje vstupní napájecí terminál X1, který slouží pro napájení celé desky. Druhou možností napájení ovládací desky je skrze programovací port X4, který slouží k naprogramování mikrokontroléru pomocí napájení z konektoru USB v PC. Tato napájecí cesta byla realizována kvůli možnosti přeprogramování mikrokontroléru při vypnuté miniponorce. Ochranu napájení z USB portu proti zkratu zajišťuje pojistka F1. Deska dále obsahuje konektor X7, který přivádí sériovou linku od řídicího PC. Konektor X2 přivádí signál z napájecí desky, který udává stav baterií. Konektor X3 vede ke spínací desce, která ovládá světlomety. Konektor X5 ovládá H-můstek elektromotorů a konektor X6 H-můstek čerpadel.

Sestavená ovládací deska (Obr. 36) byla otestována a pomocí ní se následně propojily a otestovaly všechny další desky, se kterými ovládací deska pracuje.

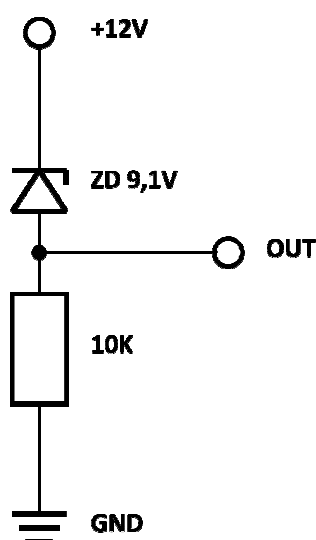


## 4.6 Napájecí deska

Napájecí deska bude sloužit k rozvodu energie do jednotlivých elektronických částí miniponorky. Zajišťovat bude také ochranu proti zkratu a měření stavu baterií. Problémem při předání napětíového signálu byl rozdíl napětíových rozsahů. Na bateriích může být napětí v rozsahu 0–14 V, kdežto A/D převodník v mikrokontroléru má rozlišovací úroveň pouze v rozsahu 0–5 V. Nutné tedy bylo výstupní napětíový signál snížit na rozsah, který bude schopen zpracovat A/D převodník.

První možností bylo použití standardního napětíového děliče, který převede rozsah 0–14 V na rozsah 0–5 V. Tento obvod je velice jednoduchý, ovšem jeho nevýhodou je následný velký kvantizační krok. Rozlišení měření za použití převodníků s děličem by tedy bylo zhruba 55 mV.

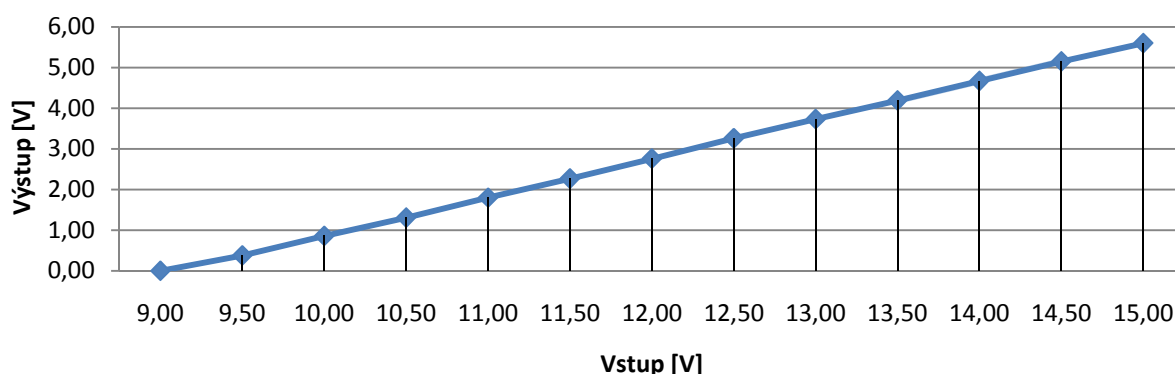
Druhou možností bylo použití obvodu se zenerovou diodou (Obr. 37), která od výstupního napětí odečte hodnotu svého závěrného napětí (Tab. 2). Vzhledem k tomu, že elektronika miniponorky přestává při napětí pod 9 V fungovat, bylo toto zapojení vhodnější, protože přenáší rozsah od 9,1–14,1 V, převedený na rozsah 0–5 V. Při tomto zapojení tedy bylo získáno měřicí rozlišení zhruba 20 mV. Charakteristika obvodu je lineární (Obr. 38) a odpovídá vzorci:  $U_{out} = ((U_{in}-9,1) - ((U_{in}-9,1) \cdot 0,05))$ .



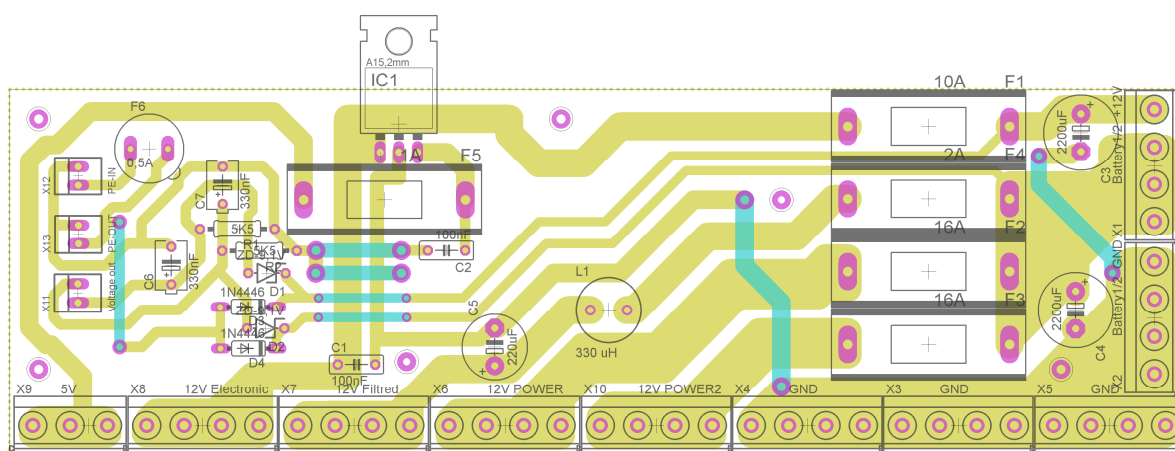
IN [V]	OUT [V]
9,00	0,00
9,50	0,38
10,00	0,86
10,50	1,31
11,00	1,80
11,50	2,27
12,00	2,76
12,50	3,26
13,00	3,73
13,50	4,19
14,00	4,67
14,50	5,15
15,00	5,60

Obrázek 37: Schéma obvodu se zenerovou diodou

Tabulka 2: Převodní charakteristika obvodu



Obrázek 38: Převodní charakteristika obvodu se zenerovou diodou

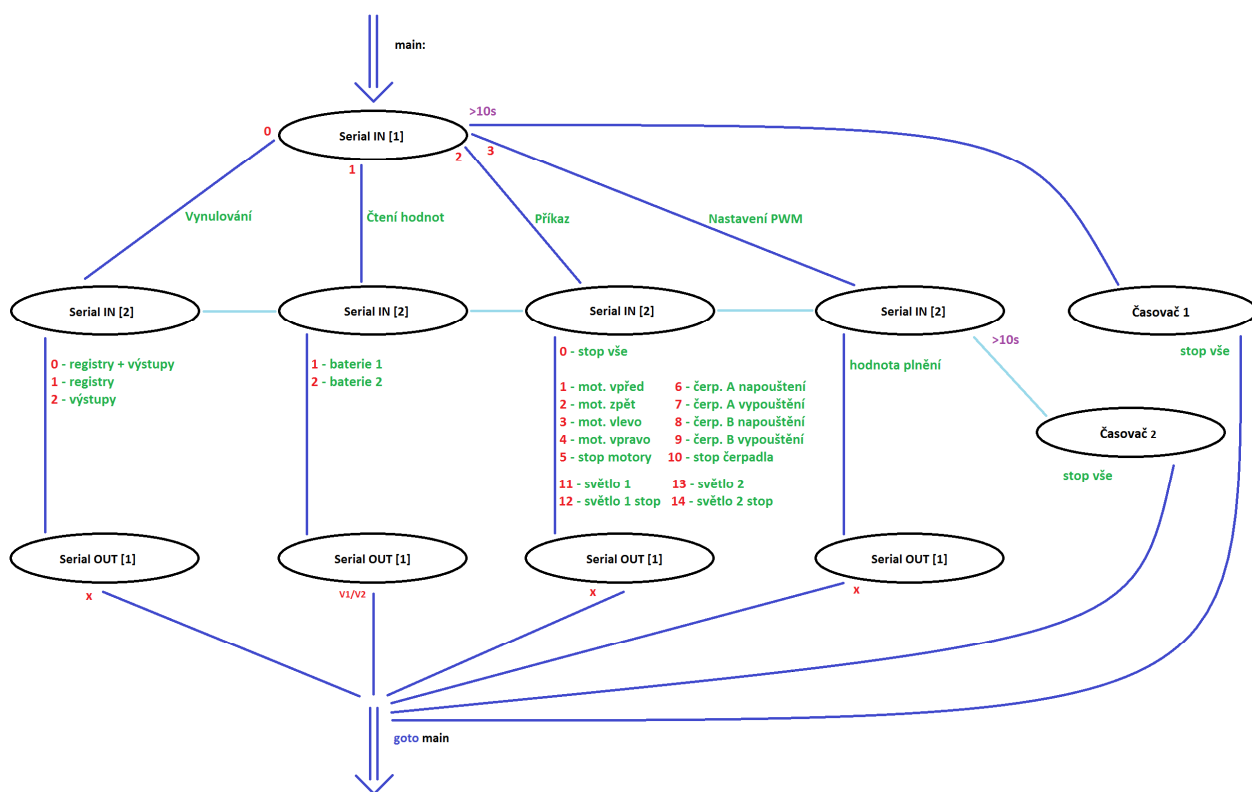


Obrázek 39: Návrh napájecí desky

Po navržení a otestování měřícího obvodu byl navržen zbytek napájecí desky. O přívod energie z baterií se starají terminály X1 a X2. Rozvod energie mezi jednotlivé další elektronické části zajišťují terminály X3 až X10 a jejich ochranu proti zkratu pojistky F1 až F5. Napájení 5 V elektroniky zajišťuje stabilizátor napětí IC1. Pro předání napěťového signálu o stavu baterií ovládací desce slouží konektor X11. Konektor X12 slouží pro přívod udržovacího napájení baterií, které je chráněno pojistkou F6. Výstup tohoto napájení pro případné další využití je realizován konektorem X13.

Po otestování obvodu byl vytvořen návrh DPS (Obr. 39). Vzhledem k tomu, že napájecí deska bude zpracovávat velké proudy, bylo rozhodnuto opět ponechat výrobu DPS univerzitnímu PCB-labu z cuprextitu se 108  $\mu\text{m}$  tlustou vrstvou mědi.

## 5 Program pro ovládací desku



Obrázek 40: Blokové schéma programu pro mikrokontrolér

Po zhotovení všech elektronických částí miniponorky začala práce na softwaru pro mikrokontrolér v ovládací desce [9]. Pro komunikaci byl navržen datový protokol, skládající se ze dvou bajtových vstupů a následně jednoho bajtového výstupu (Obr. 40). První vstupní bajt určuje typ příkazu a druhý vstupní bajt pak udává příkaz samotný. Následující výstupní třetí bajt pak nese potvrzení o vykonání příkazu, nebo v případě příkazu pro čtení dat navrácí požadovaná data. V zásadě se tedy protokol chová dvěma způsoby v závislosti na příkazu. Prvním způsobem je příkaz výkonný, pokud například potřebujeme roztočit elektromotory vpřed, bude odeslán sled dvou bajtů s hodnotami „2“ a „1“. Následně dojde k vykonání příkazu a jeho potvrzení ve výstupním třetím bajtu, který ponese hodnotu stejnou jako druhý bajt. Druhým způsobem je čtení hodnot, pokud například chceme zjistit stav baterie 1, budou odeslány dva vstupní bajty s hodnotami „1“ a „1“. Následně dojde k přečtení hodnoty z A/D převodníku a načtená hodnota bude odeslána výstupním třetím bajtem. Hrozbu přerušení komunikace řeší časovače, které v případě uplynutí 10 s od posledního příkazu, vypnou všechny akční členy.



## 6 Sestavení a otestování miniponorky

### 6.1 Montáž elektroniky do miniponorky

#### 6.1.1 Montáž elektroniky



Obrázek 41: Umístění elektroniky

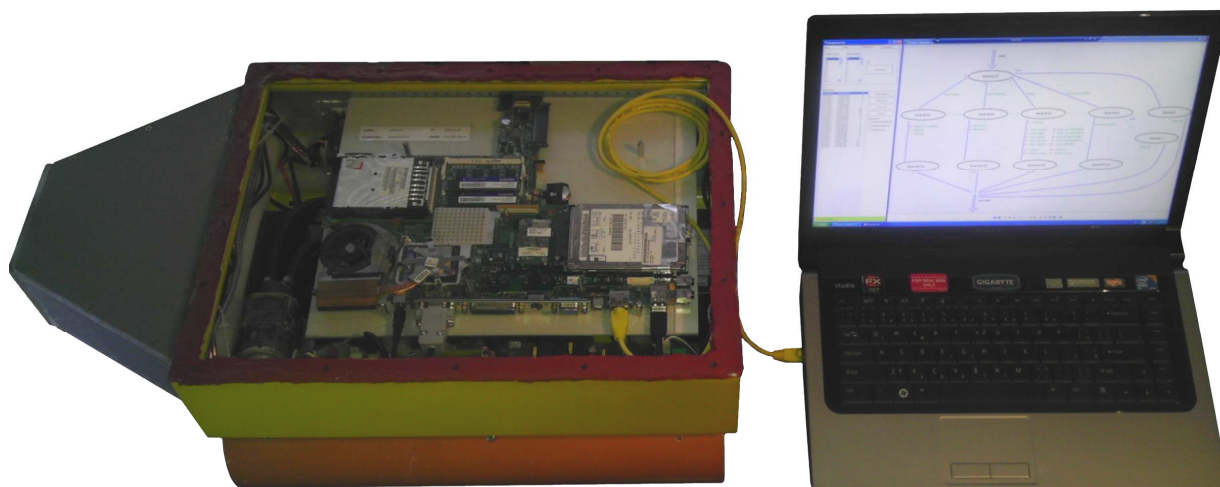


Obrázek 42: Umístění řídicího PC

Po zhotovení všech elektronických částí a navržení řídicího programu zbývalo už jen všechny díly zamontovat do miniponorky. Ve středové vyduuté části miniponorky byly umístěny gelové baterie pro napájení elektroniky. Baterie 1 bude sloužit pro napájení PC a baterie 2 pro napájení zbytku elektroniky z důvodu značných poklesů napětí při rozběhu elektromotorů, které by mohly způsobit výpadky řídicího PC. Dále byla ve středové části umístěna balastní komora a zbylý prostor byl ponechán pro umístění závaží k dovyvážení miniponorky. Elektronika byla rozmístěna po obvodu miniponorky na montážní lišty tak, aby všechny součástky vyžadující chlazení směřovaly k bočním chladičům. Dále byla doplněna veškerá datová i napájecí kabeláž, spolu s hydraulickými hadicemi k čerpadlu (Obr. 41). Následně byla na montážní sloupky umístěna do vrchní části miniponorky nosná plastová deska s řídicím PC. I na tuto desku byla přivedena veškerá potřebná datová i napájecí kabeláž (Obr. 42).



### 6.1.2 Otestování sestavy



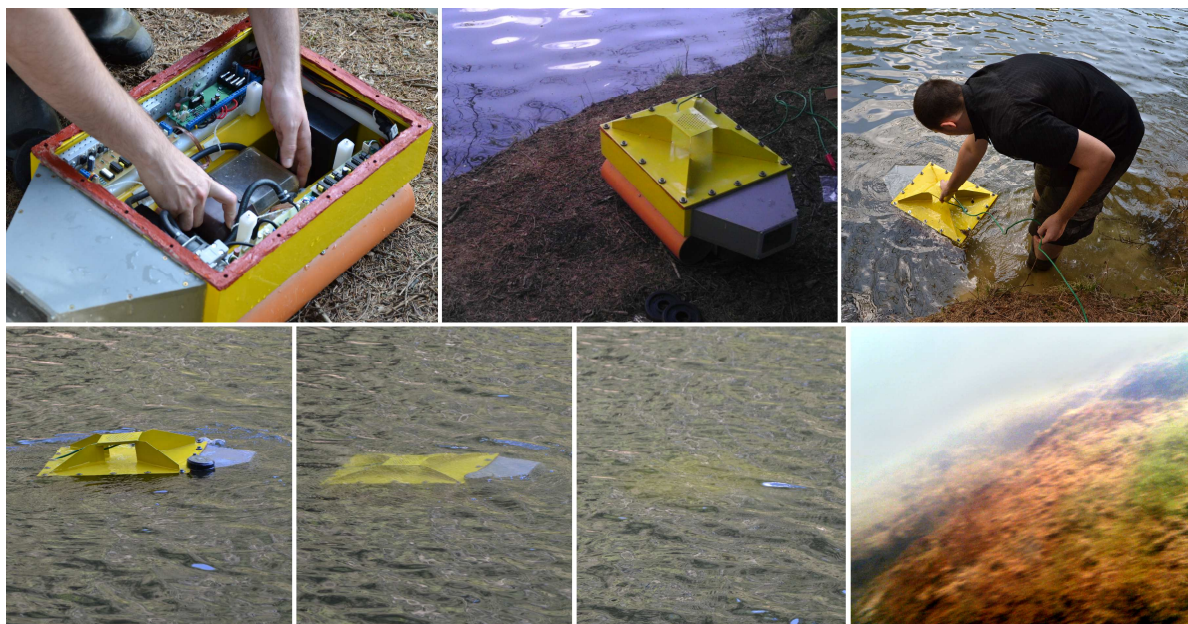
Obrázek 43: Otestování sestavy

Po zkompletování miniponorky a všech jejích nových součástí započalo testování celé sestavy, která bude použita v reálném provozu. Po nabití a připojení obou napájecích baterií byl zapnut řídicí PC a propojen s ovládacím PC pomocí ethernetového kabelu (Obr. 43). Pomocí ovládacího PC byla vytvořena komunikace s řídicím PC uvnitř miniponorky přes vzdálenou plochu. Do řídicího PC byl doinstalován program pro komunikaci se sériovým portem a pomocí něj byla otestována datová komunikace mezi řídicím PC a ovládací deskou. Dále bylo otestováno čtení hodnot z měření stavu baterií, všechny pohybové příkazy, ovládání čerpadla a světel. Otestována byla také PWM regulace pohybových elektromotorů. Elektromotory bylo možné plynule regulovat od minimálních otáček až po plný výkon.

Testování v podmínkách na souši tedy proběhlo úspěšně a miniponorka byla připravena na implementaci nového ovládacího softwaru, na kterém pracovali kolegové Tomáš Zajíc a David Svoboda. Nová ovládací aplikace už bude pracovat na bázi server-klient, kde serverová část v miniponorce bude přijímat příkazy od klientské části v ovládacím PC na souši a zároveň jí bude posílat obrazová data, získaná z kamery v miniponorce. Tato aplikace tedy nebude vyžadovat připojení pomocí vzdálené plochy a umožní tak vyšší datovou propustnost pro obrazová data.



## 6.2 Závěrečný zkušební ponor



Obrázek 44: Zkušební ponor

Po odladění a doinstalování nového softwaru byla otestována komunikace mezi ovládací deskou a serverovou částí aplikace, dále pak také komunikace mezi serverovou částí v miniponorce a klientskou částí v ovládacím PC. Všechny testy dopadly dobře a miniponorka tedy byla připravena pro zkušební ponor v reálném prostředí, který teprve ukáže funkčnost miniponorky a odhalí její případné další nedostatky. Ten proběhl 1. května na Pivovarském rybníce ve Vratislavicích nad Nisou (Obr. 44). Miniponorka zde byla na břehu oživena a ještě dodatečně dovyvážena přídatnými závažími. Následně byla vypuštěna do rybníka a ovládána byla přes ethernetový kabel z ovládacího PC na břehu. Ovládání elektromotorů miniponorky fungovalo perfektně a díky PWM regulaci nebylo problémové ani jemné otáčení nebo popojíždění pro pořízení co nejlepších záběrů. Ovládání čerpadel fungovalo také podle předpokladů a miniponorka mohla bez problémů měnit hloubku ponoru od samého dna až po vynoření na hladinu. Velice se také osvědčilo měření stavu baterií, které dalo včas vědět o jejich blížícím se vybití. Miniponorka tedy splnila všechna očekávání a po vytažení z rybníka a jejím rozdělení byla ověřena i její těsnost tím, že se uvnitř nenacházela jediná kapička vody. Tento ponor tedy proběhl úspěšně a neodhalil žádné hrubé nedostatky nové koncepce, ovšem upozornil na drobné nedostatky a tím přinesl spoustu nových návrhů do budoucna.



## 6.3 Návrhy do budoucna

### 6.3.1 Návrhy softwarových úprav

Vzhledem k tomu, že v současné sestavě putují příkazy od ovládacího přes řídicí PC až do ovládací desky, může v některém místě dojít ke zpoždění, poškození nebo úplné ztrátě příkazu. Do budoucna by tedy bylo vhodné předělat komunikační protokol na systém příkaz/odpověď, tedy tak, aby po každém příkazu následovala odpověď s potvrzením a teprve po přijetí potvrzení by následoval další příkaz, v opačném případě by se příkaz opakoval.

Vhodné by bylo též složit jeden příkaz z více bajtů doplněných o kontrolní součet určující bezchybnost přenosu příkazu. V případě vícebajtových příkazů však může dojít k desynchronizaci komunikace a poškození dat, to by však odhalil kontrolní součet a následně by bylo nutné vyvolat synchronizaci přenosu, kterou by také bylo potřeba doplnit.

### 6.3.2 Návrhy mechanických úprav

Při zkušebním ponoru v novém prostředí bylo také odhaleno nedostatečné zabezpečení elektromotorů proti nečistotám, když miniponorka nasála ze dna rybníku usazené listí, které se následně namotalo na lopatky elektromotorů a snížilo tak účinnost pohybu. Vhodné by tedy bylo doplnit průduchy elektromotorů o filtrační mřížku, která by nepropustila velké nečistoty. Vhodným doplněním by také byly delší nohy miniponorky, které by zamezily miniponorce dosednutí na úplné dno a tím i rozvření nečistot ze dna.

Jako nepraktické se také ukázalo umístění a vyzařovací úhel světlometů. Současné světlomety vyzařují v úhlu zhruba 120° a umístěny jsou v ose se zorným úhlem kamery. Kvůli tomuto umístění vzniká velké množství odrazů světla od nečistot ve vodě, které zaruší výsledný obraz kamery. Vhodnější by tedy bylo použití světlometů s menším zorným úhlem, umístěných na krajích miniponorky a vyzařujících směrem k zobrazovanému předmětu.





### 6.3.3 Návrhy elektronických úprav

Nutnou úpravou do budoucna by měla být výměna řídicího PC za novější a výkonnější model. Současný model je při práci s vyšší kvalitou videa vytížen téměř na plný výkon a do budoucna by tak neumožňoval další softwarová vylepšení. Další nevýhodou stávajícího PC je absence portů USB 2.0, kvůli které není možné využít plný potenciál kamery. S výměnou řídicího PC za novější model však nastává problém s napájením. Aktuální PC si vystačí s napájecím napětím baterií miniponorky. Novější modely ovšem potřebují minimální napětí zhruba kolem 16 V, a tudíž by bylo potřeba použít měnič napětí. Tento problém by však mohl vyřešit jeden z počítačových napájecích zdrojů určených pro napájení z automobilu, které se nedávno objevily na trhu.

Změna balastního systému z jednokomorového na dvoukomorový už je v plánu delší dobu a v rámci této práce byla provedena příprava na ovládání dvou čerpadel. Zároveň však bylo doporučeno zajistit v nových komorách možnost měření hladiny, nebo alespoň signalizaci úplného naplnění a vyprázdnění komor. V současné koncepci totiž může dojít k naplnění balastní komory a tudíž při dalším běhu k přetížení čerpadla, které by se mohlo následně poškodit.

Dalším návrhem bylo zavedení bezkontaktního měření proudu v rámci řídicího PC a všech silových ovládacích částí miniponorky. Měření odběru elektronických částí miniponorky by lépe posloužilo k odhadu času zbývajících do vybití baterií. Zároveň by také signalizovalo správný chod elektroniky a varovalo před jejím případným přetížením. To hrozí zejména při ucpání čerpadla nečistotami nebo zanesení nečistot do průduchu elektromotorů.

Dalším bezpečnostním prvkem, který by se hodil do budoucí koncepce, je kontrola těsnosti miniponorky, ta by šla realizovat pomocí několika čidel rozmístěných po miniponorce. Čidla by pak reagovala na vniknutí vody a sepnula obvod, který upozorní mikrokontrolér a ten následně odešle upozornění klientské části softwaru. Potom bude možné se s miniponorkou vypořádat dříve, než dojde k poškození elektroniky.



V budoucnu je také nutné vyřešit problematiku dobíjení baterií bez nutnosti rozdělení miniponorky. V aktuální koncepci je již hotová příprava pro zapojení udržovacího napájení pomocí Power over Ethernet, což je přívod napájení pomocí ethernetového kabelu. Tímto způsobem je přiváděno do miniponorky napětí o úrovni 14 V, sloužící pro udržování baterií. Přes takto dlouhý ethernetový kabel (cca 30 m) se však přeneše maximálně zhruba 1 A, což by znamenalo nabití baterií zhruba za 18 hodin. Mnohem výhodnější by bylo posílat přes ethernetový kabel napětí vyšší. Výrobce udává maximální napětí 48 V, při tomto napětí, které by bylo potřeba uvnitř miniponorky transformovat použitím měniče, bychom docílili při výsledných výstupních 14 V zhruba 3 A, což by zkrátilo dobu nabíjení na třetinu.

Posledním návrhem do budoucna, který také souvisí s nutností neustále rozdělovat miniponorku, je zapínání a vypínání řídicího PC. Tuto problematiku by mohlo vyřešit nové řídicí PC. Většina nových základních desek obsahuje možnost Wake on LAN, která umožňuje dálkové zapnutí PC po síti, zasláním speciálního probouzecího paketu síťové kartě. V případě, že nové řídicí PC nebude obsahovat tuto možnost, muselo by se vyřešit spínání řídicího PC propojením spínacího tlačítka s dalším spínacím prvkem, umístěným vně miniponorky, například vodotěsným tlačítkem v těle miniponorky. Druhou možností by bylo umístění speciálního magnetického spínače (Obr. 45) do přední plastové části miniponorky. Pro následné zapnutí řídicího PC by pak stačilo pouhé přiblížení magnetu ke spínacímu čidlu.



Obrázek 45: Magnetický kontakt KSK1A66-1020 [10]



## Závěr

Zadáním této práce bylo odhalit nedostatky původní koncepce miniponorky a navrhnout nové řešení elektroniky pro ovládání všech akčních členů. Dle nového návrhu elektroniku sestavit a otestovat. Dále pak vytvořit program pro mikrokontrolér, zajišťující řízení všech elektronických částí a komunikaci s řídicím PC.

Z důvodu zabezpečení elektroniky začala práce nutnými úpravami mechanických částí miniponorky, kde bylo podstatně zlepšeno její utěsnění. Dále byly také doinstalovány chladiče a montážní lišty pro bezpečné uložení veškeré elektroniky. V další části práce byla navržena nová koncepce elektroniky, která vyhovovala vedoucímu práce i ostatním kolegům, pracujícím na projektu miniponorka. Koncepce byla rozdělena do několika samostatných částí, které byly postupně navrženy, sestaveny a otestovány. Po dokončení elektroniky započal vývoj programu pro mikrokontrolér. Vývoj probíhal ve spolupráci s kolegy, vytvářejícími software pro řídicí a ovládací PC za účelem upřesnění funkcí miniponorky spolu se stanovením patřičného datového protokolu mezi řídicím PC a ovládací deskou.

Po dokončení všech hardwarových a softwarových prací byla miniponorka zkompletována a její funkčnost ověřena v laboratorních podmínkách, kde vše fungovalo podle předpokladů. Následný závěrečný zkušební ponor opět prokázal funkčnost nové koncepce elektroniky a tím byly splněny všechny cíle práce. Ponor také přinesl spoustu návrhů pro budoucí úpravy a vylepšení.

Miniponorka je aktuálně ve spolehlivém provozuschopném stavu a je připravena na testování nových dílů, elektroniky nebo softwaru, na kterých je do budoucna stále co přidávat či vylepšovat.



## Použitá literatura a zdroje informací

- [1] BURCH, Carl. Logisim [online]. 2005 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://ozark.hendrix.edu/~burch/logisim/index.html>.
- [2] CADSOFT COMPUTER GMBH. Eagle [online]. 2003 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://www.eagle.cz/>
- [3] ROUBÍČEK, Miroslav. *Návrh konstrukce experimentální dálkově řízené průzkumné miniponorky*. Liberec, 2011. Bakalářská práce. Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí bakalářské práce Miroslav Holada.
- [4] PEKLÁK, Martin. *Návrh elektronické výbavy experimentální dálkově řízené průzkumné miniponorky*. Liberec, 2011. Bakalářská práce. Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí bakalářské práce Miroslav Holada.
- [5] Pulzně šířková modulace. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2012 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzně\\_šířková\\_modulace](http://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzně_šířková_modulace).
- [6] PICAXE [online]. 2006 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://www.hobbyrobot.cz/picaxe.htm>
- [7] REVOLUTION EDUCATION LTD. PICAXE Manual: Section 1 [online]. 2012 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://robotics.ee.uwa.edu.au/eyejr/pic-controller/PICAXE-manual1.pdf>
- [8] Logické funkce: Booleova algebra. In: Johnykovy poznámky [online]. 2003 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://jjohnyk.sweb.cz/elektronika/12.htm>
- [9] PICAXE - příručka programátora [online]. 2009 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: [http://www.hobbyrobot.cz/PDF/PICAXE\\_basic\\_man\\_cz.pdf](http://www.hobbyrobot.cz/PDF/PICAXE_basic_man_cz.pdf)
- [10] GM ELECTRONIC. KSK1A66-1020 [online]. 2012 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/magneticke-kontakty/ksk1a66-1020-p634-529/>
- [11] DLOUHÝ, Martin. Robotika.cz [online]. 2005 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://robotika.cz/cs>
- [12] ADEPT TECHNOLOGY INC. Intelligent Mobile Robotic Platforms for Service Robots, Research and Rapid Prototyping [online]. 2012 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: [http://www.mobilerobots.com/Mobile\\_Robots.aspx](http://www.mobilerobots.com/Mobile_Robots.aspx)



- [13] Water Spy - A Submarine Robot. In: Engineering Project Topics and Project Ideas [online]. 2010 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://enggprojecttopics.blogspot.com/2010/06/water-spy-submarine-robot.html>
- [14] NOVÁK, Ondřej. Elektronika. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004, 178 s. ISBN 80-708-3792-6.
- [15] TKOTZ, Klaus. Příručka pro elektrotechniku. 2. dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006, 624 s. ISBN 80-867-0613-3.
- [16] GSCHEIDLE, Rolf. Příručka pro automechaniku. 2., upr. vyd. Praha: Sobotáles, 2002, 652 s. ISBN 80-859-2083-2.
- [17] MALINA, Václav. Poznáváme elektroniku I. 3. vyd. České Budějovice: KOPP, 2003, 222 s. ISBN 80-723-2039-4.
- [18] MALINA, Václav. Poznáváme elektroniku II. 1. vyd. České Budějovice: KOPP, 2002, 193 s. ISBN 80-723-2172-2.
- [19] MALINA, Václav. Poznáváme elektroniku III. 1. vyd. České Budějovice: KOPP, 1999, 240 s. ISBN 80-858-2887-1.
- [20] MALINA, Václav. Poznáváme elektroniku IV. 1. vyd. České Budějovice: KOPP, 2002, 220 s. ISBN 80-723-2173-0.
- [21] MALINA, Václav. Poznáváme elektroniku VIII: Digitální technika. 1. vyd. České Budějovice: Kopp, 2006, 430 s. ISBN 80-723-2271-0.

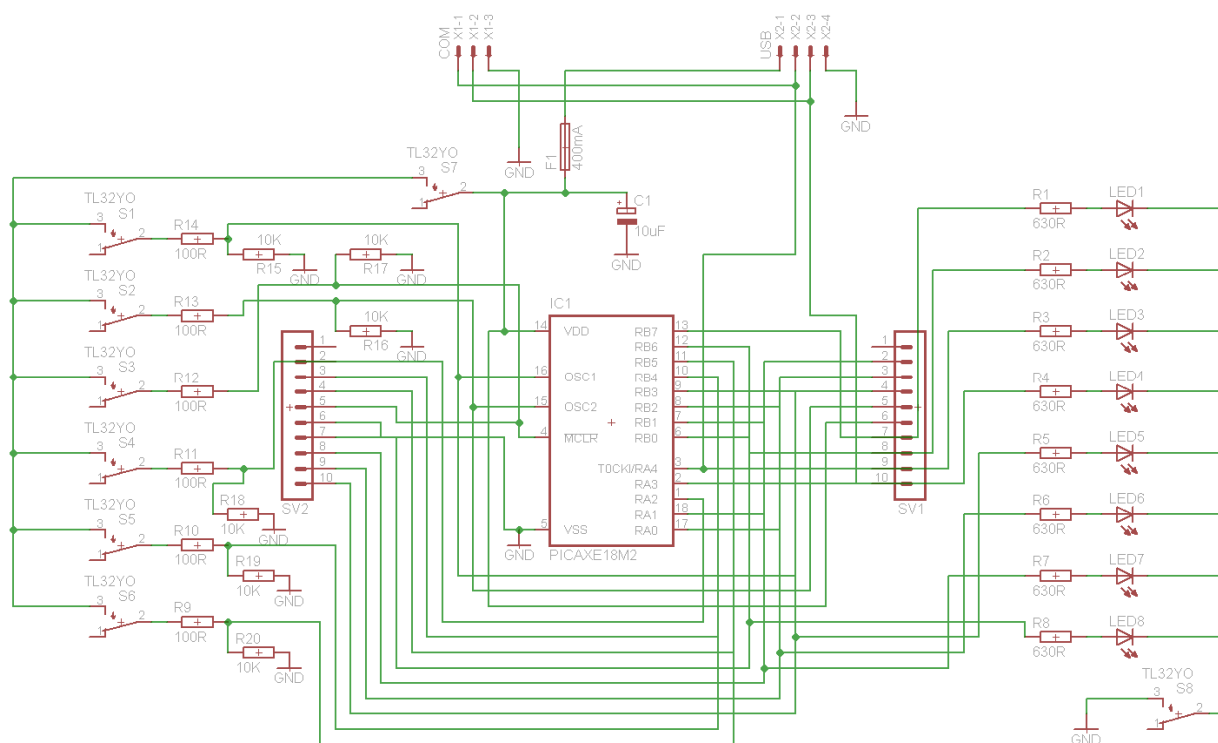
## Přílohy

### Příloha A – Příložené CD

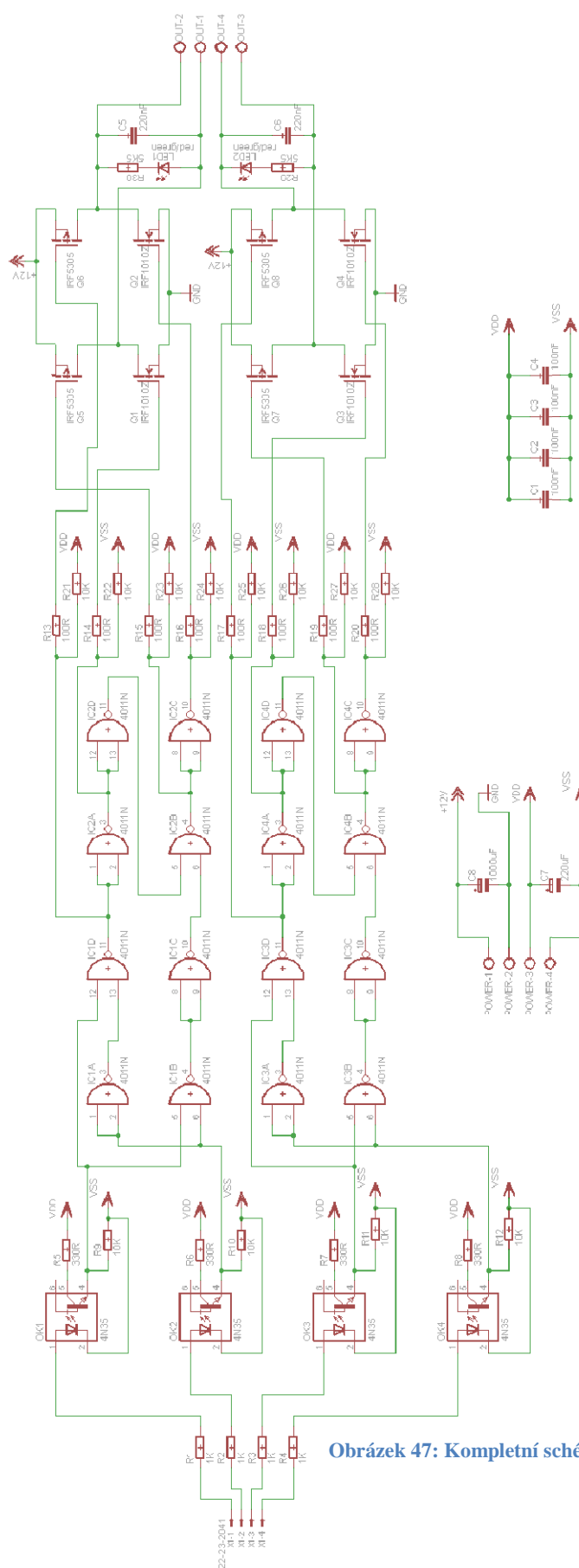
#### Příložené CD obsahuje:

- Bakalářská práce (ve formátu PDF)
- Schémata elektronických obvodů (ve formátu sch)
- Návrhy DPS (ve formátu brd)
- Zdrojový kód programu pro mikrokontrolér (ve formátu bas)
- Fotografie nových dílů miniponorky ve formátu (png)

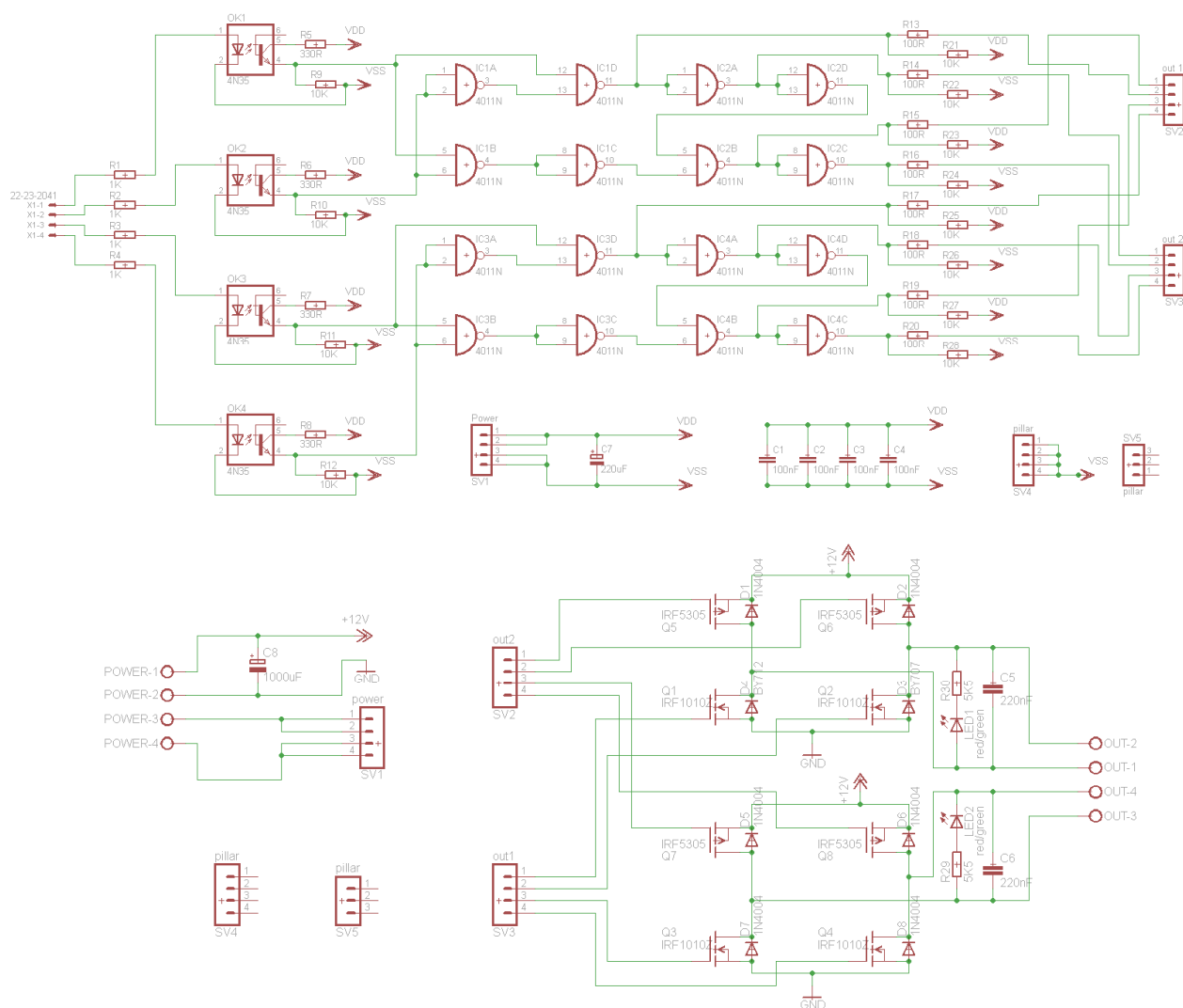
### Příloha B – Kompletní schémata



Obrázek 46: Kompletní schéma testovací desky

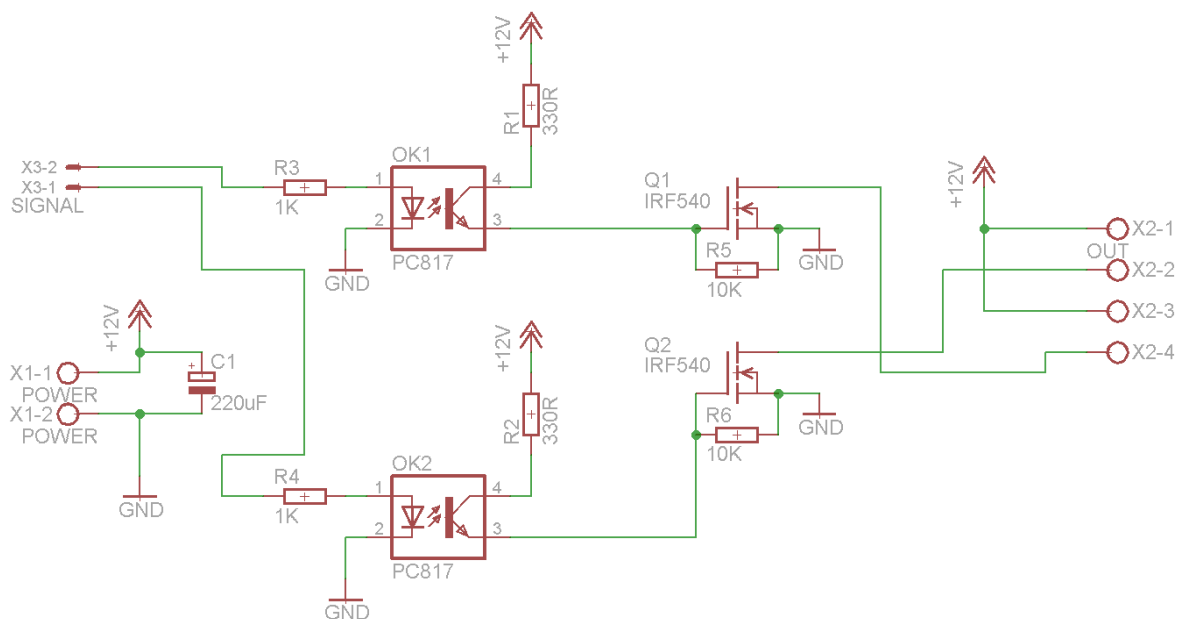


Obrázek 47: Kompletní schéma zapojení H-můstku čerpadel

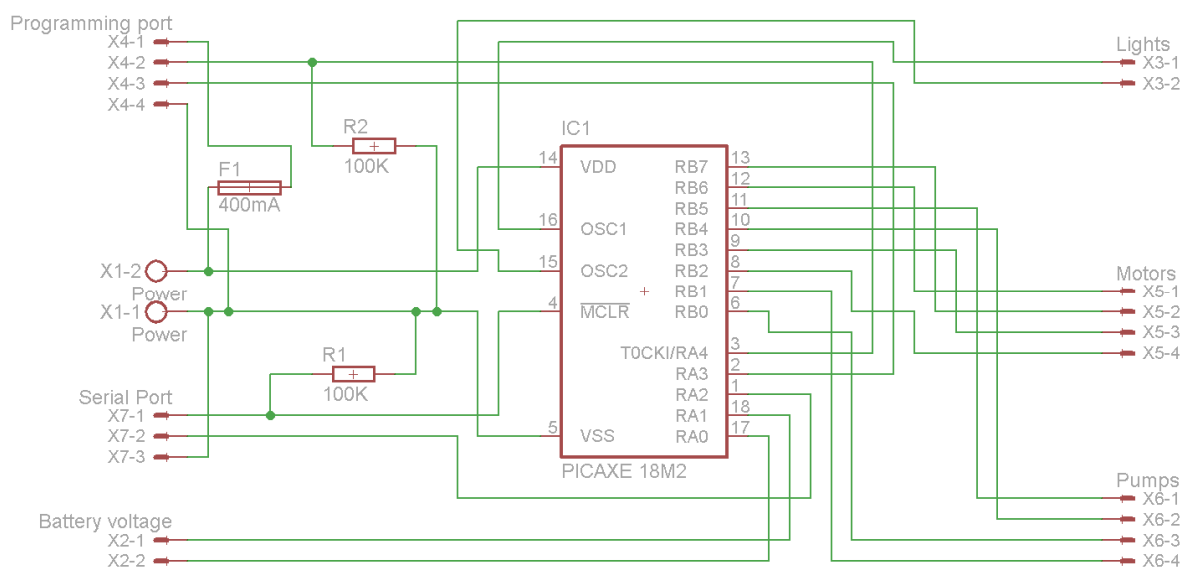


Obrázek 48: Kompletní schéma H-můstku elektromotorů

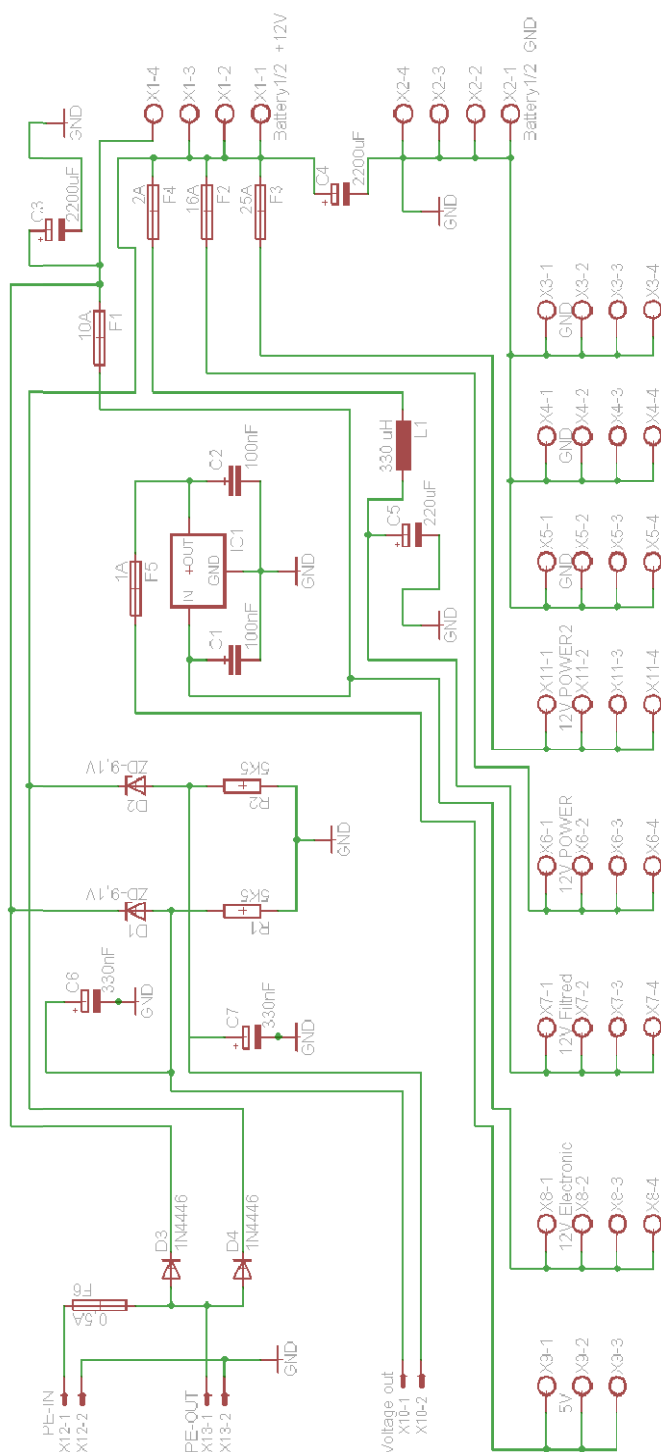




Obrázek 49: Kompletní schéma spínací desky



Obrázek 50: Kompletní schéma ovládací desky



### Obrázek 51: Kompletní schéma napájecí desky